



**ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA  
DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA  
CODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS  
E ESGOTO UTILIZANDO BIODIGESTORES  
ANAERÓBIOS DESENVOLVIDOS EM  
ESCALA DE BANCADA**

**Gabriely Fornazier Brunhara**

**Projeto de Final de Curso**

**Orientador**

**Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc**

**Dezembro  
2019**

# **ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ESGOTO UTILIZANDO BIODIGESTORES ANAERÓBIOS DESENVOLVIDOS EM ESCALA DE BANCADA**

***Gabriely Fornazier Brunhara***

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado por:

---

Prof<sup>a</sup>. Isabelli Dias Bassin, D.Sc

EQ/DEB

---

Paulo Fernando Almeida Braga, D.Sc.

CETEM/MCTIC

Orientado por:

---

Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

EQ/DEB.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil.

Dezembro de 2019

Brunhara, Gabriely Fornazier.

Estudo Experimental da Eficiência de Produção de Biogás a partir da Codigestão de Resíduos Orgânicos e Esgoto utilizando Biodigestores Anaeróbios Desenvolvidos em Escala De Bancada/ Gabriely Fornazier Brunhara. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2019.

VII, 62p.;il.

(Trabalho de conclusão de curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2019. Orientador: Claudinei de Souza Guimarães.

1. Biogás. 2. Metano. 3. codigestão anaeróbia. 4. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia Química – UFRJ/EQ). 5. Claudinei de Souza Guimarães I. Estudo experimental da eficiência de produção de biogás a partir da codigestão de resíduos orgânicos e esgoto utilizando biodigestores anaeróbios desenvolvidos em escala de bancada

*Dedico este trabalho ao meu pai Francisco Brunhara, ao meu irmão Victorio Brunhara  
e à minha mãe Kelina Fornazier (in memoriam).*

*“Acredite na força dos seus sonhos. Deus é justo e jamais colocaria em seu coração um sonho impossível de ser realizado.”*

*Autor Desconhecido*

*“A ideia é buscar o maior desafio que você pode assumir.”*

*Hugo Barra*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por ter sido meu alicerce durante todos esses anos de graduação, fortalecendo-me e não me deixando perder a conexão com meu sonho.

Ao meu Pai Francisco Brunhara e ao meu irmão Victorio Brunhara, por não terem medido esforços para que eu pudesse realizar o sonho de ser engenheira química pela UFRJ. Um sonho que acabou tornando-se de toda nossa família.

À minha mãe, Kelina Fornazier, que apesar de não estar mais presente fisicamente, aonde quer que esteja acompanhou toda minha caminhada e intercedeu por mim para que eu pudesse concluir mais esse ciclo da minha vida. Grande parte da minha força vem dela.

Ao meu orientador Claudinei Guimarães por acreditar no meu potencial e ser o primeiro a abrir as portas para mim no Rio de Janeiro, logo no 2º período da faculdade, contribuindo no desenvolvimento deste trabalho realizado no Laboratório de Controle da Poluição do Ar – LCPA/EQ/UFRJ, bem como ao David Maia por todo apoio e contribuição.

À banca pela disponibilidade de participação e oportunidade de me deixar apresentar este trabalho que tanto me orgulho.

Agradeço às minhas tias Carmem Brunhara e Vera Brunhara que sempre me apoiaram e que a cada volta ao Espírito Santo cediam ao pedido da sobrinha de fazer os almoços e pudins mais deliciosos. Sem dúvidas foram doses de estímulo e motivação.

À minha tia-avó Maria Christina Coelho e tios-avôs Adolfo Ramires III e Antônio Carlos Coelho por toda companhia e suporte na busca por casas no Rio, assim como nas mudanças que por vezes foram chatas e em cima da hora. Eu estaria encrencada sem vocês!

À “dona” Lais Dias, que abriu as portas da sua casa para mim e acabou se tornando a minha mãe carioca.

Ao meu parceiro de vida, meu amor e melhor amigo, João Gabriel Carvalho, por todo apoio, paciência, doses de motivação, bom humor e por sonhar junto comigo a minha formatura.

Aos meus sogros Albertina Gomes e Ricardo Carvalho pelos inúmeros finais de semana, e até semanas inteiras, me acolhendo em sua casa com o objetivo de me ajudarem a concluir este fim de período com menos preocupações. Vocês são incríveis!

Aos meus amigos e mestres capixabas Victor Carvalho, Turma Eletro IFES 2009, Larissa Mendes, Eliseu Semprini Filho e Fabielle Castelan. Foi difícil ficar longe de vocês.

Aos meus amigos cariocas, ou que o RJ me presenteou, Paulo Fávero, Natália Insuelas, Carolina Jorge, Carine Barros, João Pedro Monteiro, Thais Veiga, Igor Linhares e todos de 2013.2.

À Verônica Marinho por todos os ensinamentos no Laboratório de Tecnologia Ambiental – LTA/EQ/UFRJ e por ter sido uma grande motivadora ao longo desta trajetória.

À Legado Consultoria Jr pelo crescimento profissional e por me presentear com amigos tão especiais. Foi um grande desafio fundar a empresa júnior da EQ/UFRJ.

Às empresas e equipes que me acolheram até agora em minha vida profissional, e aos meus respectivos chefes, pela oportunidade e por me permitir aprender tanto com vocês, contribuindo expressivamente com meu desenvolvimento e crescimento profissional: Renato Vieira e Rafael Campos (INEA), Israel Pestana (Aires Serviços Ambientais), Paulo Braga (CETEM) e LTM/COPPE/UFRJ.

A todos os professores e ao ensino público de qualidade ao qual tive acesso em toda minha trajetória. Foram vocês que transformaram minha vida e meu futuro.

À Fundação Estudar por ter me apresentado valores, hábitos e pessoas incríveis que fizeram com que eu não desistisse do meu sonho de ser engenheira química formada pela UFRJ. Pois como dizia Viktor Frankl “Quem tem um “porquê” enfrenta qualquer “como””.

A todos vocês os meus sinceros muito obrigada! Esta trajetória foi muito difícil, por vezes parecia impossível e infinita, mas agora eu posso dizer: estou formando! E é em uma universidade pública de qualidade, a maior do Brasil!



Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Química.

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA CODIGESTÃO DE RESÍDUOS ORGÂNICOS E ESGOTO UTILIZANDO BIODIGESTORES ANAERÓBIOS DESENVOLVIDOS EM ESCALA DE BANCADA**

Gabriely Fornazier Brunhara

Dezembro 2019

**Orientador:** Prof. Claudinei de Souza Guimarães, D.Sc.

Cerca de 94 mil toneladas de resíduos orgânicos são coletados por dia no Brasil, sendo que apenas 66,5% tem sua destinação realizada corretamente, sendo dispostos em aterros sanitários. Os outros 33,5% são levados a lixões, aterros controlados, lançados em terrenos baldios, rios e mares ou até mesmo queimados. Com a perspectiva de que a digestão anaeróbia é uma alternativa para a melhoria do gerenciamento de resíduos sólidos orgânicos, o presente projeto teve por objetivo avaliar a melhor proporção da adição de lodo anaeróbio na codigestão de resíduo alimentar e esgoto. Durante 60 dias de experimentos foram utilizados dois biodigestores desenvolvidos e construídos em escala de bancada, sendo os experimentos realizados na fase mesofílica, 37°C. Os biodigestores possuíam 6 litros e foram utilizados 60% do volume total dos biodigestores e uma concentração inicial de sólidos de 10%. Inicialmente, os biodigestores B1 e B2 tiveram uma adição de 10% e 25% de inóculo, respectivamente. No sétimo dia de experimento foram adicionados 368 mL de inóculo em B1 e 453 mL em B2, totalizando 18% em B1 e 33% em B2 de inóculo. Durante os experimentos foram realizadas as principais caracterizações dos resíduos alimentares, esgoto e lodo anaeróbio, monitorando e controlando vários parâmetros, entre eles, a temperatura, agitação e pH. Foram obtidos uma produção total de biogás de 29 L (82% de CH<sub>4</sub>) para B1 e 63 L (95% de CH<sub>4</sub>) para o B2. A produção específica de CH<sub>4</sub> para os biodigestores B1 e B2 foi de, 0,618 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>removida</sub> e 0,982 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>removida</sub>, respectivamente. Por fim a baixa produção de H<sub>2</sub>S comprovou a alta eficiência dos biodigestores construídos e desenvolvidos com baixo custo para a otimização e produção de biogás e no tratamento dos resíduos.

## SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução .....	14
Capítulo 2 – Objetivos.....	16
2.1 – Objetivo Geral.....	16
2.2 – Objetivos Específicos.....	16
Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica .....	17
3.1 – Motivação do Trabalho .....	17
3.2 – Digestão Anaeróbia .....	19
3.2.1 – Etapas da Digestão Anaeróbia .....	19
3.2.2 Parâmetros que Influenciam o Processo de Digestão Anaeróbia .....	21
3.2.2.1 – Temperatura.....	21
3.2.2.2 – pH .....	22
3.2.2.3 – Disponibilidade de Nutrientes .....	22
3.2.2.4 – Substâncias Inibidoras .....	23
3.3 – Biogás.....	23
Capítulo 4 – Materiais Métodos .....	27
4.1 – Materiais.....	27
4.1.1 – Resíduos Orgânicos .....	27
4.1.2 – Inóculo (Lodo anaeróbio) .....	27
4.2 – Descrição do Sistema e Desenvolvimento dos Biodigestores utilizados neste Trabalho .....	27
4.2.1 – Biodigestores .....	28
4.2.2 – <i>Software</i> Supervisório.....	29
4.3 – Procedimentos Realizados na Caracterização dos Resultados Experimentais.....	30

4.3.1 – Preparo das Amostras .....	31
4.3.2 – Caracterização das Amostras .....	33
4.3.2.1 – pH .....	34
4.3.2.2 – Temperatura.....	34
4.3.2.3 – Umidade .....	35
4.3.2.4 – Sólidos .....	35
4.3.2.5 – Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Carbono Total .....	37
4.3.2.6 – Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) e Fósforo .....	38
4.3.2.7 – Caracterização do Biogás .....	41
Capítulo 5 – Resultados e Discussões .....	44
6.1 – Resultados da Caracterização Inicial dos Resíduos e Lodo Aneróbio .....	44
6.2 – Comportamento do pH ao longo do experimento .....	46
6.3 – Comportamento da Demanda Química de Oxigênio (DQO) durante o experimento.....	48
6.4 – Comportamento dos Sólidos .....	50
6.5 – Comportamento do Nitrogênio Total Kjeldahl e Fósforo .....	52
6.6 – Produção de Biogás em B1 e B2.....	54
Capítulo 6 – Conclusão .....	58
Capítulo 7 – Sugestões para Trabalhos Futuros .....	59
Capítulo 8 – Referências Bibliográficas.....	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Praia do Leme Rio de Janeiro..	17
<b>Figura 2</b> – Lixão de Jardim Gramacho em Duque de Caxias, RJ.....	18
<b>Figura 3</b> – Etapas do processo de digestão anaeróbia .....	20
<b>Figura 4</b> – Sistema de Biodigestores Anaeróbios com Controle e Automação desenvolvidos no LCPA/EQ/UFRJ. ....	28
<b>Figura 5</b> – Biodigestores utilizados e seus componentes. ....	28
<b>Figura 6</b> – Resistência do banho termostático (a), sensor de temperatura LM35DZ (b) e hastes de agitação (c).....	29
<b>Figura 7</b> – Interface de monitoramento do <i>software</i> supervisorio.....	30
<b>Figura 8</b> – Diagrama de blocos do procedimento experimental adotado..	31
<b>Figura 9</b> – Preparo das amostras submetidas à digestão anaeróbia. ....	32
<b>Figura 10</b> – Coleta de amostra para monitoramento do pH. ....	34
<b>Figura 11</b> – pHmetro de bancada Ionlab pH-500B-I.....	34
<b>Figura 12</b> – Balança de Umidade Gehaka IV2000.....	35
<b>Figura 13</b> – Digestor HACH DRB 200 (a) e Espectrofotômetro HACH DR5000 (b)....	37
<b>Figura 14</b> – Equipamento HACH Digesdahl®.....	39
<b>Figura 15</b> – Bolsas <i>Tedlar</i> ..	41
<b>Figura 16</b> – Sistema de Análise de Gases com CG 7820A da Agilent. ....	42
<b>Figura 17</b> – Comportamento temporal do pH no biodigestor 1 (B1). ....	47
<b>Figura 18</b> – Comportamento temporal do pH no biodigestor 2 (B2). ....	47
<b>Figura 19</b> – Monitoramento e remoção de DQO no B1. ....	49
<b>Figura 20</b> – Monitoramento e remoção de DQO no B2. ....	50
<b>Figura 21</b> – Resultados das análises de sólidos do B1. ....	51
<b>Figura 22</b> – Resultados das análises de sólidos do B2. ....	52
<b>Figura 23</b> – Resultados do monitoramento de NTK nos biodigestores B1 e B2.....	53
<b>Figura 24</b> – Resultados do monitoramento de fósforo nos biodigestores B1 e B2 .....	54
<b>Figura 25</b> – Produção acumulada de biogás para os biodigestores B1 e B2. ....	55
<b>Figura 26</b> – Comportamento da composição do biogás e pH do B2. ....	56

<b>Figura 27</b> – Comportamento da composição do biogás e pH no B1.....	57
--	----

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Composição química do biogás produzido via digestão anaeróbia.....	24
<b>Tabela 2</b> – Comparativo da composição do biogás e seu poder calorífico.....	24
<b>Tabela 3</b> – Comparativo do poder calorífico de 1m <sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis. ....	25
<b>Tabela 4</b> – Composição do material submetido à digestão anaeróbia.....	33
<b>Tabela 5</b> – Materiais e respectivos parâmetros analisados .....	33
<b>Tabela 6</b> – Resultados da caracterização do resíduo alimentar. ....	44
<b>Tabela 7</b> – Resultados da caracterização do esgoto.....	45
<b>Tabela 8</b> – Resultados da caracterização do lodo anaeróbio .....	46
<b>Tabela 9</b> – Resultados do monitoramento de DQO no B1 e B2.....	48
<b>Tabela 10</b> – Resultados da produção de biogás nos biodigestores B1 e B2. ....	54

# Capítulo 1

---

## Introdução

A preocupação com a matriz energética mundial e com a poluição ambiental é hoje umas das principais preocupações globais, sendo citadas inclusive nos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, cujo foi adotado por 150 líderes mundiais em 2015. Consequentemente há uma necessidade de desenvolvimento de tecnologias com potencial para superar a crescente demanda energética, a necessidade de segurança ambiental e o equilíbrio ecológico, desta forma, o conceito de energia renovável e sustentável é popularizado.

A digestão anaeróbia é um processo de conversão natural da matéria orgânica, realizado biologicamente pela ação de diferentes consórcios microbianos em ambiente com ausência de oxigênio, sendo considerada uma fonte de energia limpa. Como produto principal obtém-se uma mistura de gases com alto poder calorífico, denominado biogás, composto essencialmente por  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  (LASTELLA *et al.*, 2000); e, paralelamente, tem-se a geração do digestato, material líquido ou semi-sólido rico em nutrientes que apresenta potencial de aplicação em fertilização de solos. O biogás gerado pode ser utilizado diretamente como combustível em células de combustão a gás, ou até mesmo, quando purificado, utilizado como gás natural em automóveis ou na rede de gás domiciliar.

Segundo o Banco de Informações (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2018) atualmente no Brasil há 22 empresas em operação que produzem energia a partir do biogás, apresentando uma geração total de aproximadamente 167 mil kW, mas representando apenas 1,15% do total gerado a partir de biomassa. Analisando a contribuição em termos da matriz de energia elétrica, este valor cai para menos de 0,1% do total gerado pelo Brasil em suas diferentes fontes. Nota-se que no Brasil o uso de biogás como energia ainda é muito pouco adotado, traduzindo-se em uma grande perda em termos de resíduos urbanos. Frente a esse cenário, a alternativa que vem ganhando

cada vez mais destaque é a aplicação de tecnologia em conversão de resíduos orgânicos em energia, sendo utilizados técnicas e processos de aproveitamento do biogás de aterro, incineradores, bem como biodigestores.



# Capítulo 2

---

## Objetivos

### 2.1 – Objetivo Geral

Este projeto tem por objetivo geral avaliar a codigestão anaeróbia do resíduo alimentar e esgoto de uma estação de tratamento utilizando o sistema de bioreatores desenvolvido pelo Laboratório de Controle da Poluição do Ar da Escola de Química da UFRJ – LCPA/EQ/UFRJ.

### 2.2 – Objetivos Específicos

Para realização do objetivo geral, o trabalho foi dividido em 4 objetivos específicos, sendo eles:

- Estudo e definição das variáveis de processo de acordo com bibliografia;
- Caracterização dos substratos e inóculos em termos das variáveis de processo;
- Realização de duas bateladas nos biodigestores anaeróbios construídos e desenvolvidos no LCPA;
- Aprimorar metodologias para caracterização dos resultados experimentais encontrados.

# Capítulo 3

---

---

## Revisão Bibliográfica

### 3.1 – Motivação do Trabalho

A quantidade de perdas e desperdícios de alimentos aumentou muito nos últimos anos, podendo ser atrelado ao rápido crescimento da economia e população mundial. Estima-se que aproximadamente 33,3% dos alimentos produzidos no mundo, para consumo humano, sejam desperdiçados ou perdidos ao longo da cadeia produtiva. Ou seja, 1,6 bilhões de toneladas de alimentos são jogados fora por ano, segundo Ma e Liu (2019) e Slorach *et al.*(2019). Essa má gestão da produção, transporte, consumo e disposição final contribui para a degradação ambiental.

Dados do IBGE (2010) mostram que mais de 94 mil toneladas de resíduos orgânicos são coletadas por dia no Brasil, sendo que apenas 66,5% tem sua destinação realizada corretamente, ou seja, são dispostos em aterros sanitários. Os outros 33,5% são levados a lixões, aterros controlados, lançados em terrenos baldios, rios e mares ou até mesmo queimados. Fato este que gera cenários de poluição muito conhecidos pela população brasileira (**Figura 1** e **Figura 2**), além de serem locais de proliferação de vetores e doenças, mau cheiro e até fontes de geração de gases de efeito estufa (GEE):



**Figura 1** – Praia do Leme Rio de Janeiro. **Fonte:** Redação Online (2017).



**Figura 2**– Lixão de Jardim Gramacho em Duque de Caxias, RJ. **Fonte:** O Globo (2011).

Um gerenciamento inteligente dos resíduos orgânicos possibilita a recuperação energética, seja ela realizada pela ainda tradicional incineração ou pela compostagem e digestão anaeróbia. Sendo assim, uma alternativa de recuperação energética dos resíduos orgânicos é o uso do biogás, seja ele gerado nos aterros sanitários ou em processo de digestão anaeróbia. Dados do aterro sanitário de Campo Grande, no estado do Mato Grosso do Sul, mostram que o aproveitamento do resíduo sólido urbano (RSU) para biogás de aterro é cerca de 64,9 kWh/t de resíduo, frente aos 139,9 kWh/t do biogás produzido em digestão anaeróbia, onde tem-se uma geração média, de respectivamente, 1,39 MW e 2,99 MW. Além de maior capacidade energética, a digestão anaeróbia auxilia no aumento da vida útil de aterros, uma vez que a separação do resíduo não biodegradável, que é destinado ao aterro, significa cerca de 35% da quantidade original (EPE 2008). Sendo assim, uma política integrada poderia trazer bons resultados ambientais e econômicos.

No Brasil, o cenário de coleta e tratamento do esgoto doméstico não é muito diferente dos resíduos sólidos urbanos. Os últimos dados fornecidos em 2008 pelo IBGE informam que menos de 75% do esgoto doméstico é coletado no Brasil, sendo que desses, cerca de 73% são tratados, o que corresponde a um pouco mais de 53% do total gerado no país. Os outros 47% formam esgoto a céu aberto, são lançados clandestinamente em rios, mares e assim como no caso dos resíduos, são foco de

doenças, proliferação de vetores, mau cheiro, geração de GEE, além de causar contaminação de rios e comprometer a disponibilidade de água potável.

Desta forma, tendo como base que na interpretação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) os resíduos orgânicos não devem ser considerados a primeira vista como rejeitos e que esforços para promover sua reciclagem devem ser parte das estratégias de gestão de resíduos em qualquer escala; bem como a oportunidade de recuperação energética do esgoto e do resíduo orgânico por meio da digestão anaeróbia, enxerga-se neste processo de degradação da material orgânica uma oportunidade de atingirmos algumas metas da PNRS, além de diminuir os impactos ambientais e agregar valor econômico ao “lixo”.

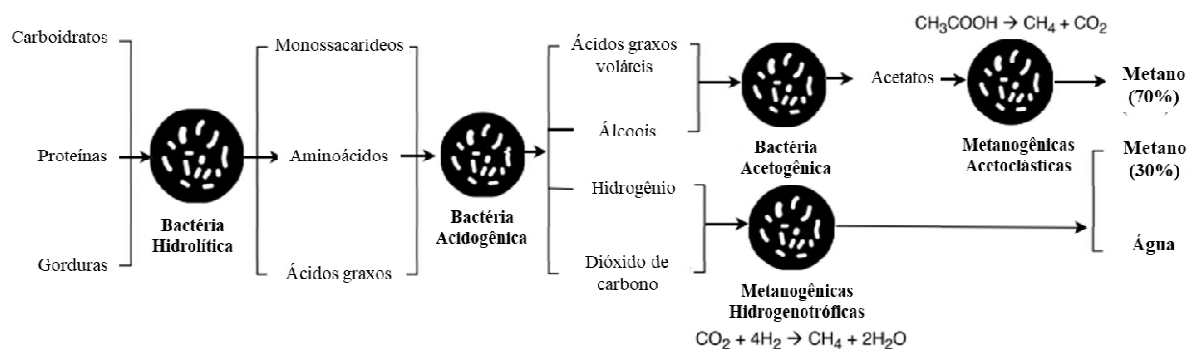
### 3.2 – Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é a tecnologia capaz de converter a matéria orgânica em energia renovável, sendo que existem diferentes características que a torna aplicável no processo de geração de energia em escala industrial (MOLINO *et al.*, 2013).

A conversão da matéria orgânica é um processo natural, realizado biologicamente pela ação de diferentes consórcios microbianos em ambiente com ausência de oxigênio. Como produto principal é obtido uma mistura de gases com alto poder calorífico, denominado biogás, composto principalmente por CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> (LASTELLA *et al.*, 2000); e, paralelamente, há a geração do digestato, material líquido ou semi-sólido rico em nutrientes que apresenta potencial de aplicação em fertilização de solos.

#### 3.2.1 – Etapas da Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo sinérgico, o qual apresenta quatro etapas e cada uma delas é realizada por grupos distintos de microrganismos. Na **Figura 3** está apresentado o processo com suas etapas, bem como os substratos, microrganismos e produtos de cada uma delas.



**Figura 3** - Etapas do processo de digestão anaeróbia

Fonte: Alterado de Srysowmeia, 2019.

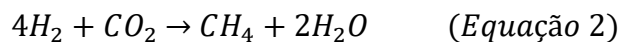
Na etapa de **hidrólise** que é, teoricamente, a primeira no processo de degradação anaeróbia, há a redução de moléculas orgânicas complexas em moléculas solúveis simples. Proteínas, lipídeos e carboidratos são hidrolisados por enzimas extracelulares produzidas por bactérias hidrolíticas, dando origem a, respectivamente, aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa e açúcares (YEBO *et al.*, 2011).

As bactérias fermentativas são as responsáveis pela etapa de **acidogênese**, caracterizada como a segunda do processo de degradação anaeróbia. Como os produtos da hidrólise são compostos solúveis simples, as células das bactérias fermentativas são capazes de absorvê-los e realizar fermentação intracelular. Na acidogênese aminoácidos, ácidos graxos de cadeia longa e açúcares são degradados em ácidos graxos voláteis,  $\text{CO}_2$ , hidrogênio e álcoois.

Seguindo para a etapa de **acetogênese**, bactérias acetogênicas oxidam os ácidos graxos voláteis formando ácidos orgânicos simples, principalmente o ácido acético,  $\text{CO}_2$  e hidrogênio. Segundo Molino (2013) as bactérias acetogênicas também são conhecidas como geradoras de acetatos.

Depois de transcorridas as etapas de hidrólise, acidogênese e acetogênese há presente no meio, basicamente, ácido acético,  $\text{CO}_2$  e hidrogênio, que serão consumidos pelas *archaeas* metanogênicas, caracterizando a quarta etapa, a **metanogênese**. Vale ressaltar que nesta etapa estão presentes ativamente dois grupos de *archaeas*, as acetoclásticas e as e hidrogenotróficas. Como os próprios nomes sugerem, as acetoclásticas produzem metano a partir de acetatos (Equação 1), enquanto as

hidrogenotróficas consomem  $\text{CO}_2$  e hidrogênio para que possam produzir metano (Equação 2).



### 3.2.2 Parâmetros que Influenciam o Processo de Digestão Anaeróbia

Por se tratar de um processo natural de decomposição de matéria orgânica, a digestão anaeróbia, assim como a maioria dos processos naturais de fermentação, apresenta maior dependência de agentes reguladores internos do que externos. Esse comportamento se dá devido ao fato das interações entre os diferentes grupos de microrganismos presentes no meio e suas respectivas funções ao longo do processo (JORDÃO E PESSÔA, 2005). Sendo assim, se faz necessário o controle dos parâmetros que afetam o equilíbrio da digestão anaeróbia, de forma a garantir condições favoráveis à realização do processo. Os principais parâmetros que influenciam no processo de digestão anaeróbia são: temperatura, pH, disponibilidade de nutrientes, substâncias inibidoras. A seguir, cada fator é analisado separadamente.

#### 3.2.2.1 – Temperatura

A temperatura é um dos parâmetros mais importantes do processo, pois além de influenciar nas atividades metabólicas do consórcio microbiano, uma vez que as acidogênicas e metanogênicas são sensíveis a variações bruscas de temperatura, também influencia no equilíbrio iônico, na umidade do meio e na solubilidade dos substratos e demais compostos como gases e orgânicos voláteis. (METCALF & EDDY, 1991; BORGES, 2003). Sendo assim, analisando-se do ponto de vista da cinética de reação, altas temperaturas seriam mais favoráveis ao processo, entretanto, segundo Ferreira (2010) a faixa de temperatura mesofílica (20 a 45°C) apresenta melhores rendimentos que as faixas termofílica (45 a 60°C) e psicrófila (<20°C), sendo obtidas maiores remoções de sólidos, um biogás com maior concentração de metano e pH mais próximo da neutralidade. A temperatura comumente usada na faixa mesofílica é 35°C.

### 3.2.2.2 – pH

Devido à sensibilidade dos microrganismos e suas diferentes faixas de pH ótimo, o pH é um fator decisivo para a estabilidade e rendimento do processo. Segundo Pramanik *et al* (2019) para cada etapa da digestão anaeróbia há uma faixa de pH que permite otimizar os resultados da mesma, sendo da hidrólise entre 5,5 e 6,0, da acidogênese entre 6,0 e 7,0, acetogênese entre 6,0 e 7,0 e da metanogênese entre 6,5 e 7,5.

Existem alguns fatores que causam a flutuação do valor de pH ao longo do processo, como por exemplo a alcalinidade, ácidos graxos voláteis, produção de CO<sub>2</sub> e a concentração de bicarbonato (KRISHNA AND KALAMDHAD, 2014). Sendo assim, como asmetonogênicas são os microrganismos mais sensíveis do processo, geralmente adota-se a faixa de pH entre 6,8 e 7,2 de forma a otimizar a etapa de metanogênese sem que as demais sejam inibidas. Vale ressaltar que, apesar da capacidade de tamponamento do processo de digestão anaeróbia, é importante a correção do pH para evitar possibilidade de inibição ou até mesmo morte dos microrganismos.

### 3.2.2.3 – Disponibilidade de Nutrientes

A concentração e composição de nutrientes como carbono, nitrogênio, fósforo, oxigênio e hidrogênio tem uma grande influência na performance da digestão anaeróbia (SRISOWMEYA *et al.*, 2019).

A razão de carbono/nitrogênio (C/N) pode ser vista como um balanço de nutrientes na digestão anaeróbia, sendo recomendada uma faixa de 15 a 30 para atingir um processo eficiente. Uma alta razão C/N provoca baixa eficiência das metanogênicas, enquanto baixas relações C/N podem ser letais para elas, uma vez que indica acúmulo de amônia e pH maior que 8,0 (MATHERI *et al.*, 2016).

Além de carbono e nitrogênio, para obtenção de uma metanogênese otimizada deve-se atentar-se à concentração de macronutrientes como fósforo e enxofre, cujas presenças também são essenciais. Segundo Sperling (1996), a relação C:N:P no meio em digestão anaeróbia deve ser de 350:5:1. Em termos de micronutrientes, o sódio, cálcio e potássio apresentam concentrações ótimas de, respectivamente, 350mg/L, 150 a

300mg/L e menor que 400mg/L. Estudos sobre efeito de metais pesados na performance da metanogênese mostraram que os metais pesados apresentam toxicidade relativa seguindo  $Zn > Cr > Cu > Cd > Ni > Pb$  (CIRNE, PALOUMET & BJO, 2007).

#### 3.2.2.4 – Substâncias Inibidoras

Substâncias inibidoras são aquelas que influenciam de forma negativa a atividade metabólica dos microorganismos responsáveis pela digestão anaeróbia.

Como já foi citado anteriormente, podemos ter substâncias inibidoras na forma de nutrientes em altas concentrações como é o caso do nitrogênio, sódio e potássio, bem como na forma de outros compostos como os metais pesados, sulfetos e amônia.

### 3.3 – Biogás

O biogás é um combustível renovável composto por 50 a 85% de metano ( $CH_4$ ) e 20 a 35% de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), sendo considerado uma tecnologia global promissora para superar a falta de energia (SRISOWMEYA *et al.*, 2019), substituindo combustíveis fósseis que são geradores de GEE em combustão domiciliar ou comercial (Y. Li *et al.*, 2019).

Segundo Cassini (2003) traços de gás sulfídrico ( $H_2S$ ), nitrogênio ( $N_2$ ), hidrogênio ( $H_2$ ), amônia ( $NH_3$ ) e oxigênio ( $O_2$ ) também pode ser encontrados no biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Na **Tabela 1** estão apresentados os compostos e seus respectivos teores encontrados. Esta variação da composição do biogás é devido aos diferentes substratos que podem ser utilizados na digestão anaeróbia.



**Tabela 1** – Composição química do biogás produzido via digestão anaeróbia.

**Fonte:** Cassini *et al.* (2003).

Composto	Teor (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	50 – 75
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	25 – 40
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1,0 – 3,0
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0,5 – 2,5
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,1 – 1,0
Gás sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 – 0,5
Amônia (NH <sub>3</sub> )	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0 – 0,1

O poder calorífico do biogás relaciona-se diretamente com a concentração de CH<sub>4</sub> presente, ou seja, quanto maior o teor de metano, maior será a capacidade calorífica do biogás. Na **Tabela 2** verifica-se esta relação.

**Tabela 2** – Comparativo da composição do biogás e seu poder calorífico

**Fonte:** Adaptado de Aveliar 2010

Composição Química	Peso Específico (kg/Nm <sup>3</sup> )	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Poder Calorífico (kcal/Nm <sup>3</sup> )
10% CH <sub>4</sub> – 90% CO <sub>2</sub>	1,8393	465,43	856,06
40% CH <sub>4</sub> – 60% CO <sub>2</sub>	1,4643	2338,52	3424,29
60% CH <sub>4</sub> – 40% CO <sub>2</sub>	1,2143	4229,98	5136,46
65% CH <sub>4</sub> – 35% CO <sub>2</sub>	1,1518	4831,14	5564,50
75% CH <sub>4</sub> – 25% CO <sub>2</sub>	1,0268	6253,01	6420,59
95% CH <sub>4</sub> – 5% CO <sub>2</sub>	0,7768	10469,60	8132,78
99% CH <sub>4</sub> – 1% CO <sub>2</sub>	0,7268	11661,02	8575,23

Analisando-se a substituição de combustíveis atuais pelo uso do biogás, pode-se fazer uma comparação em termos de poder calorífico frente a 1 m<sup>3</sup> de biogás com cerca de 65% de metano, ou seja, aproximadamente 5500 kcal/Nm<sup>3</sup>. Na **Tabela 3** encontra-se esta comparação.

**Tabela 3** – Comparativo do poder calorífico de 1m<sup>3</sup> de biogás em relação a outros combustíveis.

Fonte: Silva *et al.*(2009).

Gasolina	Gasóleo	Diesel	GLP	Eletricidade	Lenha
0,610 L	0,700 L	0,550 L	0,450 kg	1,428 kWh	1,538 kg

Em termos de aplicabilidade, o biogás pode ser usado diretamente como combustível em geradores de eletricidade por combustão interna, micro-turbinas e em células combustíveis (MAGHANAKI *et al.*, 2013), podendo também ser adicionado à rede de gás domiciliar. Entretanto, o biogás pode também ser matéria-prima de produtos de maior valor agregado como metanol.

Seguindo para as vantagens e desvantagens do biogás, em termos de tratamento de resíduos, tem-se um processo natural de tratamento de resíduos orgânicos, que demanda menor espaço em relação a aterros sanitários e compostagem, além de reduzir o volume de resíduo a ser disposto. Em termos energéticos, é uma fonte de energia renovável, produzindo um combustível de alta qualidade que, por consequência, acrescenta-lhe vantagens ambientais, pois diminui a emissão de gás metano para a atmosfera e produz um resíduo considerado biofertilizante rico em nitrogênio e fósforo. Em termos de vantagens econômicas, a produção de biogás demanda um custo de investimento elevado, entretanto como proporciona redução do consumo de energia elétrica, gás de cozinha e diminui significativamente o descarte de resíduos, em uma perspectiva a longo prazo a adoção do sistema é interessante economicamente.

Como desvantagens, por ser um processo natural e que demanda certo controle, principalmente de temperatura e pH, a digestão anaeróbia pode não ocorrer de forma correta, acarretando a formação de H<sub>2</sub>S, gás altamente tóxico e corrosivo. Sendo assim, necessita-se de devida atenção e cuidado no projeto dos biodigestores de forma que resista a gases corrosivos e mantenha manutenção preventiva do sistema, garantindo a conformidade do processo. Segundo Yue (2019) embora os métodos em escala de bancada não sejam economicamente viáveis, a integração e a aplicação em escala industrial produzirão mais valor, pois é necessário levar em consideração que as

estratégias devem ser mais autossuficientes e economicamente viáveis em termos de energia.

# Capítulo 4

---

## Materiais e Métodos

Neste capítulo será apresentada a caracterização dos materiais selecionados e utilizados nos experimentos para otimização do tratamento dos resíduos e produção de biogás, em paralelo com a construção e desenvolvimento dos biodigestores anaeróbios.

### 4.1 – Materiais

#### 4.1.1 – Resíduos Orgânicos

Os resíduos orgânicos utilizados no presente trabalho apresentam duas origens distintas, sendo:

- i. Resíduo alimentar do Restaurante Universitário do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, após o serviço de alimentação e
- ii. Esgoto domiciliar de uma estação de tratamento de esgoto da cidade do Rio de Janeiro.

#### 4.1.2 – Inóculo (Lodo anaeróbio)

Como inóculo do processo utilizou-se o lodo anaeróbio da estação de tratamento de efluentes líquidos de um aviário localizado na cidade do Rio de Janeiro. A escolha deste inóculo foi devido ao fato de apresentar todos os consórcios microbianos necessários para realização da degradação anaeróbia da matéria orgânica.

### 4.2 – Descrição do Sistema e Desenvolvimento dos Biodigestores utilizados neste trabalho

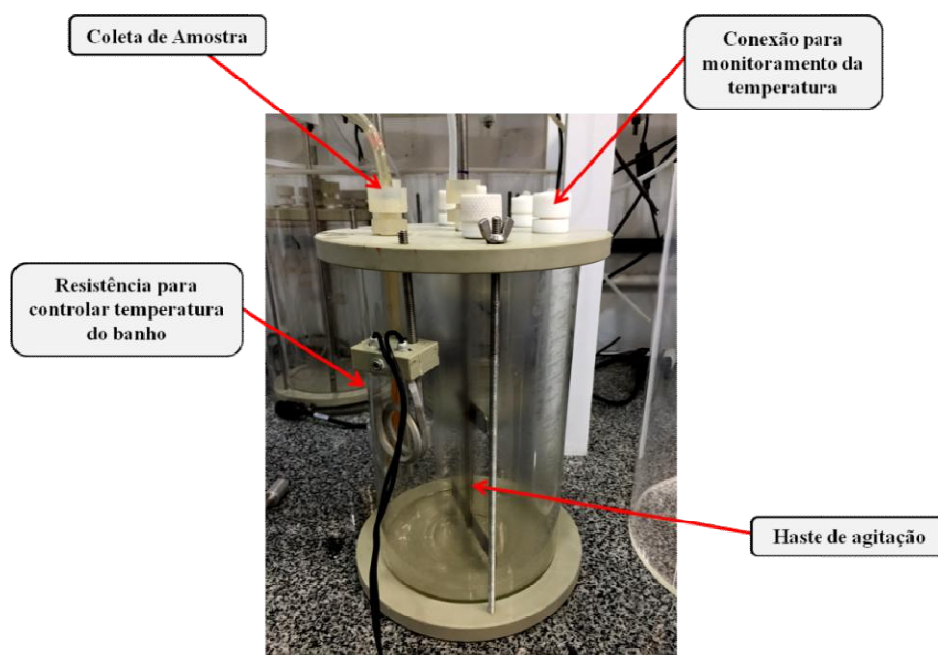
O sistema completo dos biodigestores utilizados é constituído por materiais de baixo custo, porém com alta eficiência e tecnologia, conforme será apresentado durante os resultados obtidos. Na Figura 4 é apresentado o sistema completo que foi utilizado durante os experimentos.



**Figura 4** – Sistema de Biodigestores Anaeróbios com Controle e Automação desenvolvidos no LCPA/EQ/UFRJ.

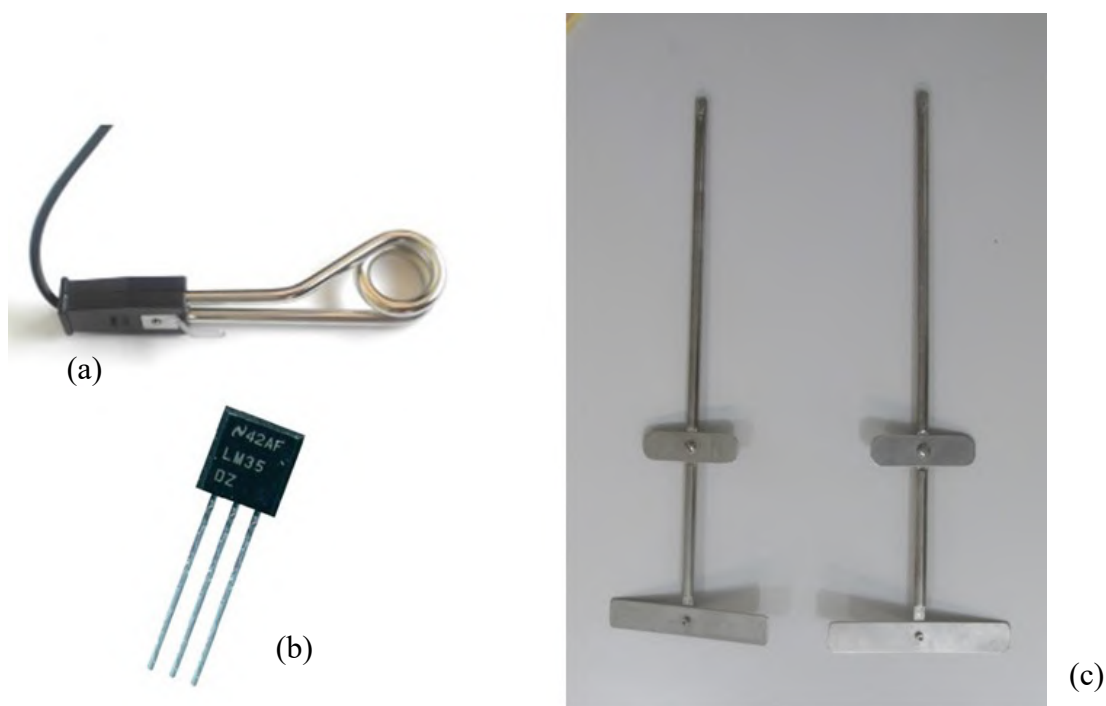
#### 4.2.1 – Biodigestores

Os biodigestores do LCPA/EQ/UFRJ são recipientes cilíndricos de vidro com capacidade média de 6 litros, uma base de apoio em material isolante do qual também foi feita sua tampa. Na tampa estão presentes aberturas e conexões necessárias para realização da agitação, monitoramento e controle da temperatura e coleta de amostras. O vedamento do equipamento é feito pelo contato da borda superior do cilindro com sua tampa, por meio de um ajuste de pressão com parafusos, arruelas e porcas borboletas. A **Figura 5** apresenta o sistema físico dos biodigestores.



**Figura 5** – Biodigestores utilizados e seus componentes.

O controle de temperatura do processo é realizado por um banho termostático, sendo o monitoramento desta variável feito pela presença de sensores de temperatura do tipo LM35DZ no material em digestão e no banho. Para garantir a homogeneização da mistura, o sistema de agitação é composto por agitador axial de pás retas que estão fixadas na altura média e na extremidade inferior da haste. Na **Figura 6** estão apresentados os modelos dos dispositivos utilizados.



**Figura 6** – Resistência do banho termostático (a), sensor de temperatura LM35DZ (b) e hastes de agitação (c).

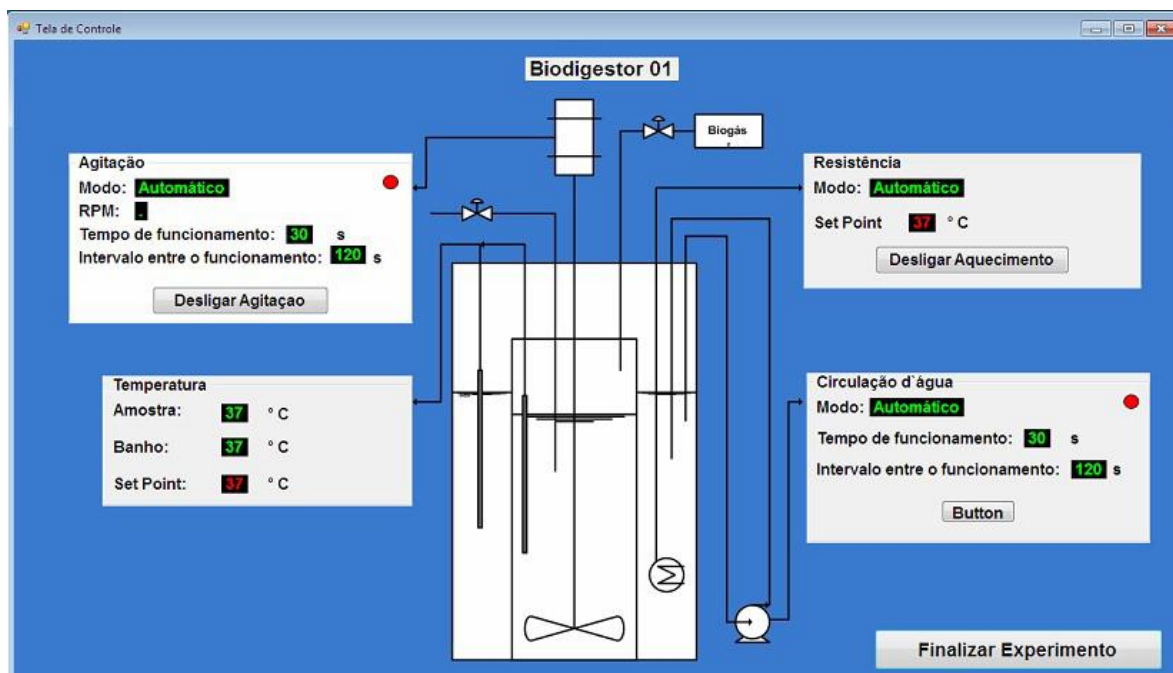
#### 4.2.2 – *Software* Supervisório

O *software* supervisorio desenvolvido para este sistema apresenta interface de fácil operação e proporciona ao usuário o controle e monitoramento da temperatura e agitação do processo. Para a agitação são oferecidas as opções de controle manual e automático, tempo e intervalo de funcionamento. Para a variável temperatura, o *software* oferece a configuração da temperatura de digestão que, de forma automática, configura a temperatura da resistência responsável pelo aquecimento do banho ao mesmo valor.

A fim de que o banho termostático seja eficiente no aquecimento de todo o material em digestão, a homogeneização da temperatura do banho é feita pela

configuração do parâmetro circulação de água, que pode ser manual ou automático, podendo ser definido tempo e intervalo de funcionamento.

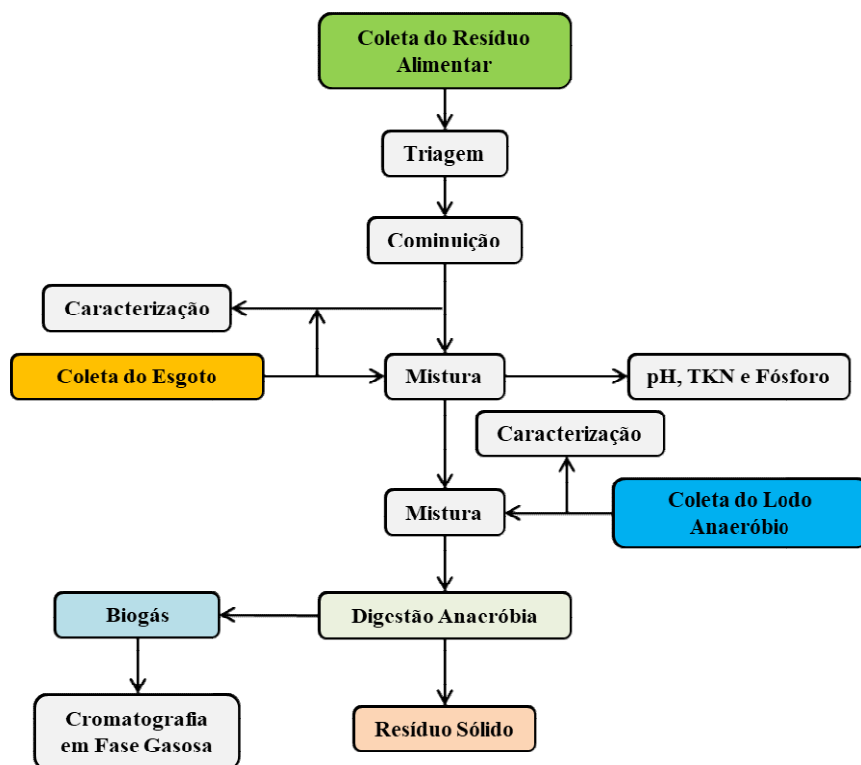
Vale ressaltar que, como a temperatura do processo é de extrema importância, o *software* é configurado para gerar um banco de dados a cerca do monitoramento desta variável ao longo de todo processo, podendo ser consultado a qualquer momento pelo operador. A **Figura 7** apresenta interface de monitoramento do *software* supervisorio.



**Figura 7** – Interface de monitoramento do *software* supervisorio

#### 4.3 – Procedimentos Realizados na Caracterização das Amostras

De forma global, o procedimento experimental empregado foi composto por preparo e caracterização das amostras, sendo cada etapa descrita neste capítulo. A **Figura 8** ilustra todas as etapas executadas experimentalmente.



**Figura 8** – Diagrama de blocos do procedimento experimental adotado.

#### 4.3.1 – Preparo das Amostras

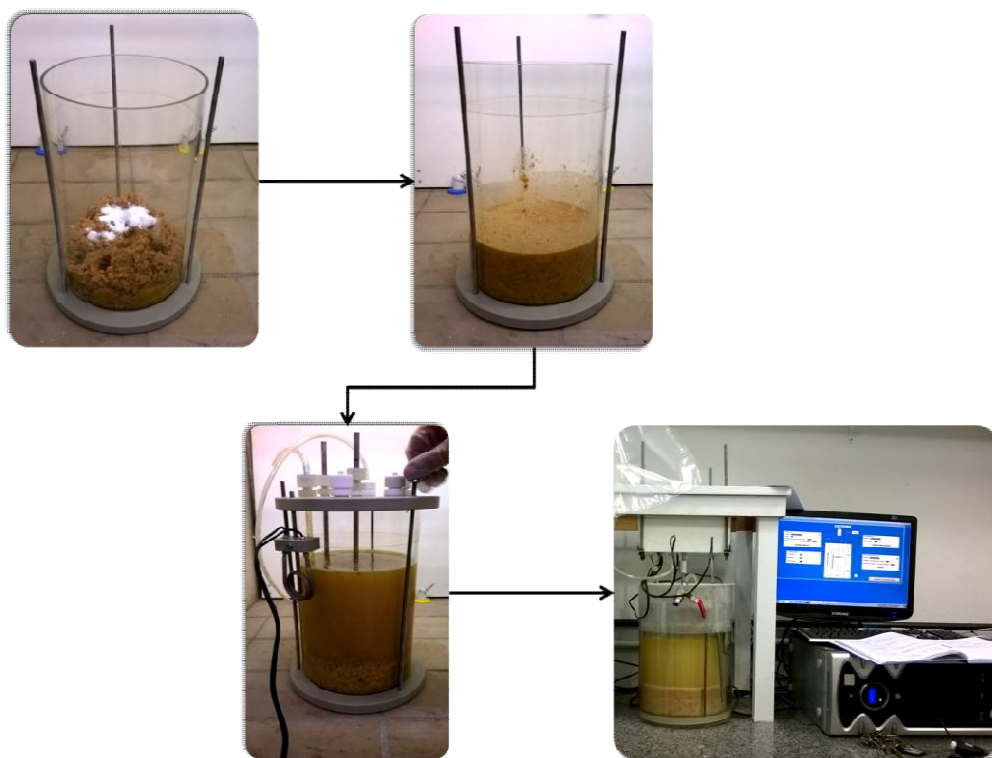
O preparo do resíduo orgânico coletado no Restaurante Universitário da UFRJ foi conduzido em quatro etapas contemplando triagem, cominuição, pesagem e correção de pH, esta última que foi realizada juntamente com o esgoto.

Ao ser coletado, o resíduo alimentar foi transportado ao LCPA-EQ/UFRJ e em seguida realizada uma triagem, tendo como objetivo a retirada de materiais que apresentavam potencial de causar danos ao equipamento de trituração. Na etapa seguinte, de cominuição, o resíduo alimentar foi transferido para um microprocessador de alimentos, sendo processado até apresentar aspecto pastoso. Em seguida foram pesadas as massas de resíduo alimentar referentes a cada biodigestor, de forma a garantir a estratégia de proporção definida. Em paralelo, o esgoto foi avolumado em proveta conforme proporção definida e em seguida o resíduo alimentar e o esgoto foram transferidos para os respectivos biodigestores. Depois de homogeneizados os materiais nos biodigestores, o pH foi medido e corrigido para a faixa da neutralidade, entre 6,8 e 7,2. De forma a respeitar a proporção DQO:N:P (350:5:1) (VON SPERLING, 1996) e



garantir o ambiente ideal para os consórcios microbianos, foi realizada a suplementação de nitrogênio e fósforo utilizando, respectivamente, cloreto de amônia ( $\text{NH}_4\text{Cl}$ ) e uma combinação de fosfato mono e dipotássico ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$  e  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), quando necessário.

Com as devidas proporções de esgoto e resíduo alimentar adicionadas aos biodigestores, bem como realizada a correção do pH e da proporção DQO:N:P do meio, o lodo anaeróbio foi adicionado na sua devida proporção e rapidamente os equipamentos foram vedados. Para coleta do biogás gerado foram acopladas bolsas de *Tedlar* e em seguida os biodigestores foram submetidos às condições experimentais: 37°C e agitação constante de 5rpm. Na **Figura 9** estão ilustradas as etapas de preparo das amostras.



**Figura 9** – Preparo das amostras submetidas à digestão anaeróbia.

Na **Tabela 4** estão apresentadas as composições dos materiais submetidos à digestão anaeróbia de acordo com o biodigestor e os substratos e inóculo adicionados, sendo utilizados 60% do volume total dos biodigestores e uma concentração inicial de sólidos de 10%. Os experimentos foram realizados em dois biodigestores identificados como B1 e B2. Inicialmente, o B1 foi alimentado com 10% de inóculo, enquanto o B2 com 25%. No sétimo dia foram adicionados 368 mL de inóculo no B1 e 453 mL ao B2,

totalizando, respectivamente 18 e 33%. Esta prática, de adição complementar de lodo, foi adotada de forma preventiva com o objetivo de garantir a presença de todos os consórcios microbianos necessários à digestão anaeróbia, uma vez que alguns microrganismos podem ter sido inibidos e mortos nos primeiros dias de operação.

**Tabela 4** – Composição do material submetido à digestão anaeróbia

	<b>V útil</b> (mL, %)	<b>Lodo</b> (mL, %)	<b>Massa RA</b> (g, %)	<b>Esgoto</b> (mL, %)
<b>B1</b>	3676,8   60%	367,7   10% 368,0   18%	1716,6   52% 47%	1415,5   38% 35%
<b>B2</b>	3618,0   60%	904,5   25% 453,0   33%	1407,6   43% 38%	1160,7   32% 29%

#### 4.3.2 – Caracterização das Amostras

A caracterização das amostras foi realizada com base no monitoramento dos parâmetros envolvidos no processo de digestão anaeróbia, utilizando métodos analíticos quantitativos de referência e reconhecidos pela comunidade acadêmico-científica, conforme descrição apresentada posteriormente neste capítulo. Ressalta-se que todas as análises foram realizadas em triplicata.

Os parâmetros analisados na caracterização inicial dos materiais, bem como monitorados ao longo do processo de digestão anaeróbia realizada neste estudo, foram pH, temperatura, umidade, sólidos (ST, STF e STV), demanda química de oxigênio (DQO), nitrogênio total kjeldahl (NTK), fósforo e biogás produzido. A **Tabela 5** – Materiais e respectivos parâmetros analisados apresenta as análises realizadas no trabalho.

**Tabela 5** – Materiais e respectivos parâmetros analisados

<b>Parâmetros Analisados</b>							
<b>Amostra</b>	<b>pH</b>	<b>Umidade</b>	<b>Sólidos</b>	<b>DQO</b>	<b>NTK e Fósforo</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Biogás</b>
<b>Resíduo Alimentar</b>	x	x	x	x	x		
<b>Esgoto</b>	x	x	x	x	x		
<b>Lodo Anaeróbio</b>		x	x	x			
<b>Biodigestores</b>	x		x	x	x	x	x

#### 4.3.2.1 – pH

A análise de pH foi realizada diariamente nos biodigestores e, quando necessário, era corrigido com adição de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) ou hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), sendo realizada sua releitura para constatação da correção dentro da faixa ótima de 6,8 a 7,2.

Para monitoramento de pH, uma amostra de aproximadamente 50 mL era retirada dos biodigestores, por sucção, através de uma válvula instalada nos mesmos, conforme **Figura 10**. De posse da amostra, o pH era determinado utilizando o phmetro de bancada Ionlab pH-500B-I apresentado na **Figura 11**, conforme método padrão *Standart Methods* (APHA, 2005).



**Figura 10** – Coleta de amostra para monitoramento do pH.



**Figura 11** – phmetro de bancada Ionlab pH-500B-I.

#### 4.3.2.2 – Temperatura

A partir do *software* supervisorio, a temperatura do processo foi programada para se manter em 37°C, sendo medida em intervalos de 1 segundo através de um sensor imerso no material submetido à digestão. E caso necessário, era corrigida automaticamente pelo sistema embarcado de controle.

#### 4.3.2.3 – Umidade

A umidade foi determinada utilizando o analisador de umidade Gehaka IV2000, apresentado na **Figura 12**. Dentre os resultados apresentados no relatório impresso pelo analisador, estavam massa inicial, massa final e umidade, em porcentagem.



**Figura 12** – Balança de Umidade Gehaka IV2000.

#### 4.3.2.4 – Sólidos

Para caracterização em termos de sólidos, foram realizadas as análises de sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV), conforme o Método 2540 (APHA, 2005).

O procedimento experimental iniciava-se com a seleção de cadinhos de porcelana, sendo em seguida lavados com água destilada e levados à mufla por 1h a 550°C. Logo depois os cadinhos foram resfriados em dessecador, onde permaneceram por cerca de 1h até atingir a temperatura ambiente. Passado esse período de 1h, os cadinhos foram pesados em balança analítica, sendo tomados seus pesos ( $P_0$ ). Ainda na balança analítica, adicionavam-se porções de amostra (em g ou mL) aos cadinhos, sendo os mesmos levados à estufa por um período de 12h a 100°C. Após as 12h, os cadinhos foram resfriados em dessecadores onde permaneceram por cerca de 30min, sendo em seguida tomados seus respectivos pesos, identificados como  $P_1$ .

Logo após, os cadinhos foram direcionados à mufla onde, por um período de 30min, foram submetidos a uma temperatura de 550°C para calcinação. Concluída esta etapa, os cadinhos foram novamente transferidos para dessecadores onde permaneceram

por 1h e em seguida foram pesados novamente, sendo tomado o peso  $P_2$ . Para cálculo dos respectivos teores de sólidos totais, totais fixos e totais voláteis, as seguintes equações foram utilizadas:

i. Amostras sólidas:

$$ST(\%) = \frac{(P_1 - P_0) * 100}{P - P_0}$$
$$STF(\%) = \frac{(P_2 - P_0) * 100}{P_1 - P_0}$$
$$STV(\%) = \frac{(P_1 - P_2) * 100}{P_1 - P_0}$$

ii. Amostras líquidas:

$$ST(g/L) = \frac{(P_1 - P_0) * 1000}{V}$$
$$STF(g/L) = \frac{(P_2 - P_0) * 1000}{V}$$
$$STV(g/L) = \frac{(P_1 - P_2) * 1000}{V}$$

Sendo:

ST: sólidos totais;

STF: sólidos totais fixos;

STV: sólidos totais voláteis;

$P_0$ : massa no cadinho vazio, g;

P: massa de amostra adicionada + cadinho, g;

$P_1$ : massa do cadinho + amostra após 12h a 100°C na estufa, g;

$P_2$ : massa de cadinho + amostra após 30min a 550°C na mufla, g;

V: volume de amostra adicionada ao cadinho, mL.

#### 4.3.2.5 – Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Carbono Total

A determinação da demanda química de oxigênio (DQO) foi realizada conforme o Método 5520 D (APHA, 2005), sendo usado o equipamento DRB 200 da HACH para digestão e o Espectrofotômetro DR5000 da HACH para leitura dos resultados. Na **Figura 13** estão apresentados os respectivos equipamentos.



**Figura 13** - Digestor HACH DRB 200 (a) e Espectrofotômetro HACH DR5000 (b)

Para o resíduo alimentar, a primeira etapa do procedimento consistiu em solubilizar em água destilada uma massa de aproximadamente 5 g, transferindo-a para um balão volumétrico de 200 mL e aferindo-o com água destilada. Em caso de amostras líquidas, esta etapa não era necessária. A partir da solução representativa da amostra a ser analisada, foram realizadas diluições com o objetivo de não extrapolar a curva de calibração do equipamento de leitura. Em seguida, 2mL de amostra eram adicionados aos tubos de DQO, seguidas de 2 mL de solução digestora ( $K_2Cr_2O_7 + HgSO_4 + H_2SO_4$ ) e 1,2 mL de solução catalítica ( $Ag_2SO_4 + H_2SO_4$ ). Com os tubos de DQO devidamente fechados, as amostras eram homogeneizadas e levadas à digestão por 2h a 150°C no DRB 200. Após a digestão, os tubos de DQO foram transferidos para um recipiente onde permaneceram até total resfriamento. Ressalta-se que todo procedimento de digestão foi realizado também com água destilada para que fosse gerado o branco da análise.

Após resfriamento à temperatura ambiente, no Espectrofotômetro DR5000 foi selecionado o programa DQO, certificando-se que o comprimento de onda de leitura era

600nm, dando assim início à leitura dos resultados. Então, primeiramente adicionou-se o branco à cubeta, zerando a leitura do equipamento e repetindo este procedimento a cada três amostras lidas. Desta forma, seguiram-se as leituras de todas as amostras, sendo o resultado expresso em quantidade de oxigênio necessário para oxidar a fração orgânica da amostra.

Caracterizada a amostra em termos de DQO, determinou-se a concentração de Carbono Total (CT) conforme equação:

$$CT = \frac{DQO_T}{2,667}$$

Onde:

CT: carbono total

se amostra sólida em mg/g;

se amostra líquida em mg/L.

#### 4.3.2.6 – Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) e Fósforo

Para as análises de nitrogênio total kjeldahl (NTK) e fósforo foram utilizados, respectivamente, os métodos HACH 8075 *Nessler Method* e HACH 8048 *PhosVer3®Method*, sendo necessária, inicialmente, a digestão ácida das amostras no digestor Digesdahl® e a leitura dos resultados realizada no Espectrofotômetro DR5000 ambos da HACH.

##### i. Digestão das amostras

Preliminarmente, o *set-point* do Digesdahl® foi configurado em 440°C e enquanto o equipamento atingia o *set-point*, adicionou-se 0,5 g de amostra ao balão volumétrico de digestão Digesdahl® de 100 mL, seguidos de 4 mL de ácido sulfúrico PA e algumas pérolas de vidro. No caso de amostras líquidas e do branco, os 0,5 g foram substituídos por 5 mL.

Preparadas as amostras e atingidos os 440°C, o balão volumétrico foi posicionado sobre a placa de aquecimento, bem como montado todo o sistema de vidrarias, conforme **Figura 14**.



**Figura 14-** Equipamento HACH Digesdahl®

Conforme verificado o início do refluxo na coluna de fracionamento, foram cronometrados 4 min e em seguida adicionados 10 mL de peróxido de hidrogênio 50%, sendo marcado 1 min de reação após todo o peróxido ser adicionado ao balão volumétrico e enfim retirado o balão do aquecimento, conforme determina-se o método analítico. Decorrido o resfriamento, o balão volumétrico foi aferido e homogeneizado, concluindo a etapa de digestão das amostras.

ii. Determinação de Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK)

Em um balão volumétrico de 25 mL foi adicionado 1mL de solução digerida + 1 gota de indicador NTK. Em seguida, foram adicionadas gotas de KOH 8N, uma a uma, homogeneizando a solução a cada gota, até ser observado o primeiro feixe de coloração azul, indicando que o pH estava na faixa de 3. Por conseguinte, adicionou-se gotas de KOH 1N, seguindo o mesmo procedimento anterior, entretanto, até o aparecimento de coloração azul permanente, atingindo pH entre 3 e 4.

Atingida a coloração azul permanente, foram adicionadas cerca de 20 mL de água destilada + três gotas de estabilizador mineral + três gotas de agente dispersante, aferindo o balão com água destilada e homogeneizando-o. Ao balão aferido foi adicionado 1mL de reagente de *Nessler*, homogeneizando novamente o balão e cronometrando 2 min de



reação. Todo este procedimento também foi realizado com o branco previamente digerido.

Para leitura dos resultados, foi selecionado no espectrofotômetro DR5000 o método 399, verificando que o comprimento de onda de leitura era o de 460nm e então passados os 2min de reação, a primeira leitura realizada foi a do branco, transferindo-o para uma cubeta de 10 mL, zerando o equipamento e dando seguimento à leitura das amostras de interesse. Fazendo-se necessário o procedimento com o branco a cada três leituras de amostras.

De posse dos resultados do espectrofotômetro, a seguinte equação foi utilizada para determinar a concentração de nitrogênio nas amostras:

$$[NTK] = \frac{A * 75}{B * C}$$

Onde:

[NTK]: concentração de nitrogênio na amostra, se amostra sólida, mg/g; se amostra líquida, mg/L.

A: resultado na leitura do espectrofotômetro, mg/L.

B: massa, ou volume, de amostra digerida, g ou mL.

C: volume de solução adicionada ao balão volumétrico de 25 mL, mL.

### iii. Determinação de Fósforo

Na determinação de fósforo, 1mL da amostra previamente digerida foi transferida a um balão volumétrico de 25 mL, aferindo-o com água destilada e homogeneizando a solução. Em uma cubeta de vidro, foram adicionados 10 mL da amostra diluída + um pacote de reagente *PhosVer3*®, fechando-a e agitando-a vigorosamente por 30s para total homogeneização da solução.

Enquanto aguardava-se o tempo de reação de 2 min, selecionou-se o método 490 no espectrofotômetro, conferindo a leitura no comprimento de onda de 880nm. Paralelamente, 10 mL do branco digerido foram adicionados em uma cubeta de vidro e

utilizados para zerar nossas leituras. Passados os 2 min, iniciaram-se as leituras das amostras e a cada três leituras, o procedimento com o branco foi repetido.

Com os resultados do espectrofotômetro, as seguintes equações foram aplicadas para enfim determinar a concentração de fósforo na amostra.

$$[PO_4^{-3}] = \frac{A * 2500}{B * C}$$

$$[P] = [PO_4^{-3}] * 0,3261$$

Onde:

$[PO_4^{-3}]$ : concentração de fosfato na mostra; se amostra sólida, mg/g; se amostra líquida, mg/L.

A: resultado na leitura do espectrofotômetro, mg/L.

B: massa, ou volume, de amostra digerida, g ou mL.

C: volume de solução adicionada ao balão volumétrico de 25 mL, mL.

[P]: concentração de fósforo na amostra, se sólida mg/kg; se líquida mg/L.

#### 4.3.2.7 – Caracterização do Biogás

No decorrer do processo de digestão anaeróbia o biogás gerado foi coletado em bolsas *Tedlar* de 2 e 5L, apresentadas na **Figura 15**, e sua composição determinada por cromatografia de fase gasosa. O cromatógrafo utilizado foi o CG 7820A da Agilent (**Figura 16**) com detectores de condutividade térmica (DCT), ionização de chama (DIC) e injeção manual.



**Figura 15** – Bolsas *Tedlar*. Fonte: Energética® Qualidade do Ar.



**Figura 16** – Sistema de Análise de Gases com CG 7820A da Agilent.

**Fonte:** LCPA/EQ/UFRJ.

Para construção das curvas de calibração foram utilizados os seguintes parâmetros e condições:

- **Tipo de Coluna:** Coluna HP-PLOT/Q (30m x 0,530mm x 40,0 $\mu$ m);
- **Padrões:** Padrão White Martins com certificado de qualidade ISO 9001;
- **Tipo de Cilindro:** ALQ padrão primário;
- **Pressão:** 155,00 kgf/cm<sup>2</sup> ou 15.200,31 kPa;
- **Volume:** 2300 m<sup>3</sup>;
- **Concentrações:** N<sub>2</sub>O = 1.000 ppm; CH<sub>4</sub> = 15.000 ppm; CO<sub>2</sub> = 20.000 ppm; H<sub>2</sub>S = 5.000 ppm. Sendo pareparadas, através de diluição com N<sub>2</sub>, dez diluições com faixas distintas de concentração com para a construção das curvas.

Por conseguinte, para análise das amostras de biogás foram utilizadas as seguintes condições:

- **Entrada com divisor de Fluxo 2:1;**

Aquecedor: T = 200 °C e

Pressão de 8psi.

- **Coluna:**

Fluxo = 7 mL/min e

P constante de 8psi.

– **Forno:**

T = 35°C e

Tempo de 6,0 minutos.

– **Detectores utilizados:** TCD (DCT), T = 160°C;

– **Fluxo referência** de 26 mL/min e

**Fluxo auxiliar** de 5 mL/min.

– **Gás de arraste:** hélio (He).

# Capítulo 5

## Resultados e Discussões

Neste capítulo serão abordados e discutidos, inicialmente, os resultados obtidos nos experimentos de codigestão anaeróbia de resíduo alimentar do Restaurante Universitário da UFRJ e esgoto domiciliar na presença de inóculo em escala de bancada, tendo o período de experimentos em ambos os biodigestores (B1 e B2) totalizado 60 dias.

### 6.1 – Resultados da Caracterização Inicial dos Resíduos e Lodo Aneróbio

Na **Tabela 6** e **Tabela 7** estão apresentados, respectivamente, os resultados da caracterização química do resíduo alimentar coletado no RU da UFRJ e do esgoto domiciliar coletado em uma ETE do município do Rio de Janeiro.

Em ambos os biodigestores foram utilizados os mesmos resíduos, distinguindo-se apenas a composição em termos de resíduo alimentar, esgoto e inóculo, conforme apresentado anteriormente na **Tabela 4**.

**Tabela 6** – Resultados da caracterização do resíduo alimentar.

Parâmetro	Resultado
pH	5,46
Umidade (%)	82,60
Peso Seco (%)	17,40
DQO (mg/gRAu)	179,77
CT (mg/gRAu)	67,41
NTK (mg/gRAu)	5,55
Relação C/N	12,14
Fósforo (mg/gRAu)	0,00724
Densidade	0,91
ST (mg/gRAu)	173,84
STF (mg/gRAu)	4,99
STV (mg/gRAu)	168,86

**Tabela 7 - Resultados da caracterização do esgoto.**

<b>Parâmetros</b>	<b>Resultado</b>
<b>pH</b>	6,5
<b>DQO (mg/L)</b>	387,00
<b>CT (mg/L)</b>	145,11
<b>NTK (mg/L)</b>	29,60
<b>C/N</b>	4,90
<b>Fósforo (mg/L)</b>	210,33
<b>ST (mg/L)</b>	1010,00
<b>STF (mg/L)</b>	506,70
<b>STV (mg/L)</b>	503,30

Com base nas tabelas apresentadas acima, observa-se que o pH tanto do esgoto, como do resíduo alimentar, estavam fora da faixa ótima para o processo, que é de 6,8 a 7,2. Desta forma, quando transferidos aos biodigestores em suas respectivas proporções, o substrato final (resíduo alimentar + esgoto) teve seu pH devidamente corrigido com carbonato de cálcio. Procedimento este que foi executado diariamente ao longo do processo.

Em termos de DQO, o resíduo alimentar apresentou valores próximo aos encontrados na literatura, podendo admitir valores nas faixas de 114 a 135 mg/g (BOLZONELLA *et al.*, 2003) e 102 a 183 mg/g (CHECCI *et al.*, 1991). Tendo como referência os mesmo autores citados anteriormente, observa-se que o teor de NTK está abaixo do encontrado em seus trabalhos, que é de cerca de 14 a 16 mg/g, entretanto, nos trabalhos de Koch *et al.* (2016) os valores de NTK são cerca de 4,5 mg/g. Este resultado pode ser explicado pelo fato do resíduo alimentar ter composição variável conforme sua origem, podendo apresentar algumas flutuações de parâmetros, consequentemente, dependendo do resíduo utilizado, será mais ou menos necessário o uso de suplementos para correção das condições ótimas do meio afim de otimizar o processo.

Os resultados de sólidos, por sua vez, também se apresentaram dentro do encontrado na literatura, chamando atenção pelo fato de que cerca que 97% são de

sólidos voláteis, ou seja, fração orgânica da matéria. Desta forma, sendo um fator positivo para o processo de degradação anaeróbia.

Quando analisamos os resultados do esgoto, vemos uma grande concentração de sólidos, sendo praticamente 50% de fixos e 50% de voláteis. Este resultado pode ser explicado devido à sua coleta ter sido realizada após o decantador primário, mas antes do secundário, uma vez que nesta etapa do processo de tratamento de esgoto ainda há muito sólido a ser removido.

A caracterização do lodo anaeróbio foi realizada em termos de DQO e sólidos, admitindo que os demais parâmetros encontravam-se em concentrações adequadas. Na **Tabela 8** está apresentada a caracterização do respectivo material.

**Tabela 8** - Resultados da caracterização do lodo anaeróbio

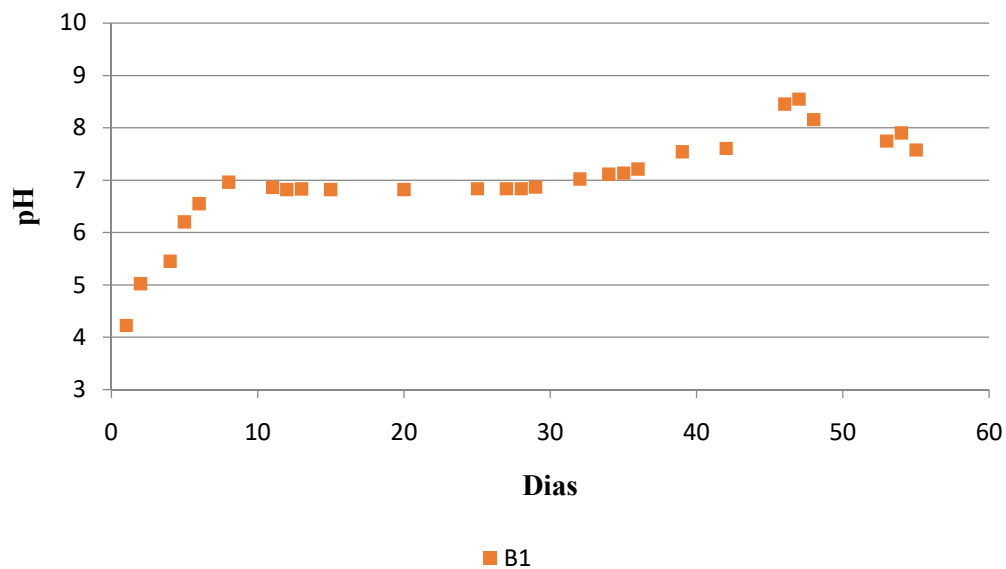
Parâmetro	Resultado
DQO (mg/L)	38425,00
ST (mg/L)	53360,00
STF (mg/L)	23060,00
STV (mg/L)	30300,00

Observamos nestes resultados que o lodo anaeróbio apresenta altos valores de DQO e sólidos, valores estes por razão de ser o inóculo do processo, ou seja, contém todos os microorganismos e demanda ambiente adequado para sobrevivência e crescimento dos mesmos.

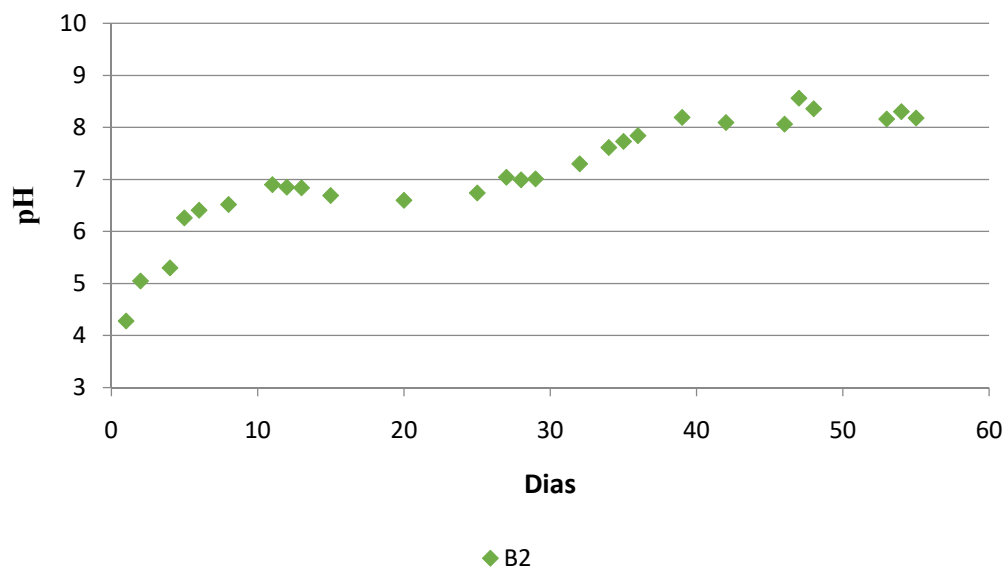
## 6.2 – Comportamento do pH ao longo do experimento

No decorrer do processo de digestão anaeróbia houve, diariamente, o monitoramento do pH do meio, sendo realizada correção com carbonato de cálcio ou hidróxido de sódio todas as vezes que o pH apresentava-se menor que 7,00.

Os resultados obtidos são expressos nas **Figura 17** e **Figura 18**.



**Figura 17** – Comportamento temporal do pH no B1 antes da correção.



**Figura 18** – Comportamento temporal do pH no B2 antes da correção.

Analisando os gráficos, observa-se que o comportamento do pH em ambos os biodigestores foi similar, começando com valores próximos de 4 e por volta do décimo dia, atingindo a neutralidade. Este comportamento se dá pelo fato do processo estar em suas etapas iniciais conhecidas como fermentativas, onde há produção de ácidos voláteis, contribuindo para a diminuição do pH.

Entre o décimo e o quadragésimo quinto dia o pH mostrou um comportamento estável em torno de uma faixa entre 6,5 a 7,0, ou seja, um indicativo de que estava



havendo consumo dos ácidos voláteis gerados nas etapas fermentativas e que o processo de digestão anaeróbia estava avançando.

Por fim, houve uma flutuação do pH em torno de 8, podendo ser interpretado como uma baixa na formação dos ácidos voláteis frente ao alto consumo pelas etapas subsequentes da digestão anaeróbia, havendo um desequilíbrio no sistema.

### 6.3 – Comportamento da Demanda Química de Oxigênio (DQO) durante o experimento

Como a demanda química de oxigênio (DQO) é uma medida indireta da quantidade de matéria orgânica presente na amostra, ela foi monitorada de forma estratégica, pois a avaliação da sua remoção é indicativo da taxa de degradação da matéria orgânica biodegradável presente no substrato. Ou seja, quanto maior a remoção de DQO, maior será a taxa de produção de biogás, podendo chegar a uma conversão de 80% de DQO em biogás em um período inferior a 300 dias de operação (SGORLON *et al.*, 2009).

Na **Tabela 9** são apresentados os resultados do monitoramento de DQO ao longo do processo de digestão anaeróbia realizado nos biodigestores B1 e B2 do LCPA/EQ/UFRJ.

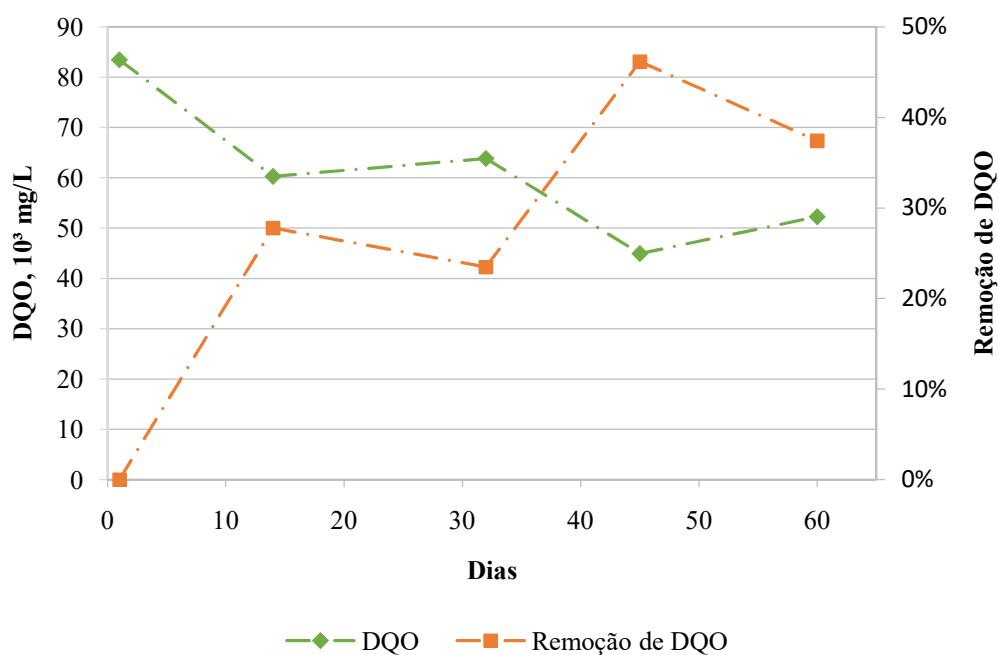
**Tabela 9** – Resultados do monitoramento de DQO no B1 e B2.

	Dias de Operação	DQO (mg/L) $\pm$ DP	Remoção de DQO (%)
<b>B1</b>	0	83416 $\pm$ 0	-
	14	60233 $\pm$ 231	28
	32	63833 $\pm$ 551	23
	45	44900 $\pm$ 100	46
	60	52233 $\pm$ 833	37
<b>B2</b>	0	75080 $\pm$ 0	-
	14	55733 $\pm$ 493	26
	32	62167 $\pm$ 416	17
	45	23633 $\pm$ 208	69
	60	14067 $\pm$ 473	81

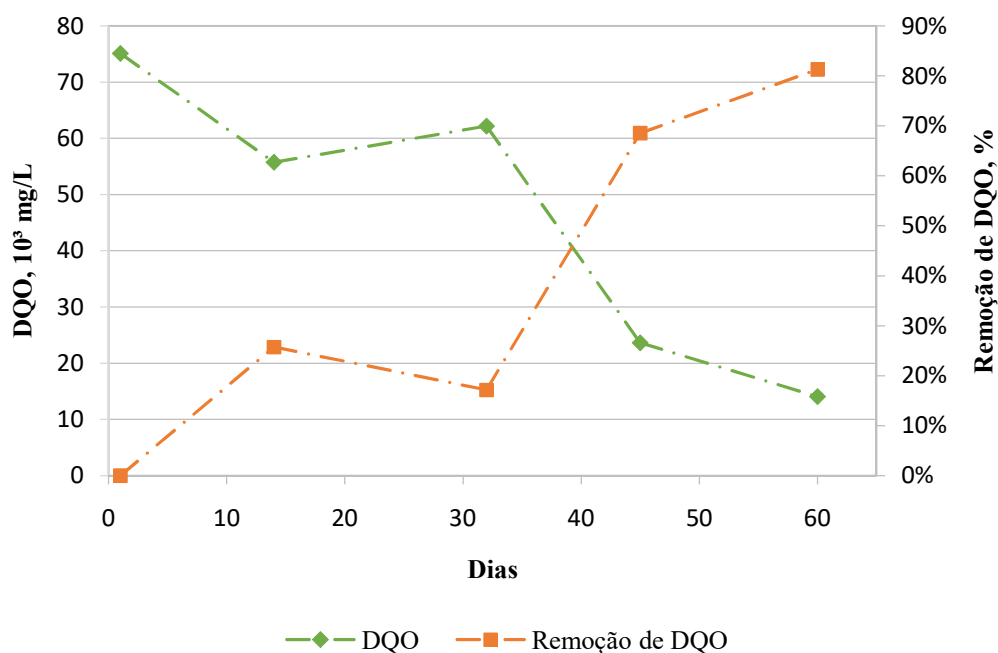
Analisando os resultados apresentados na tabela, verifica-se que em ambos os casos a remoção de DQO quase atingiu a casa dos 30% com 14 dias de operação, seguida de uma pequena queda nos 15 dias subsequentes e voltando novamente a crescer até os 45 dias (B1) e 60 dias (B2).

Entretanto, o biodigestor 2 (B2) apresentou melhor remoção de DQO, cerca de 1000 mg/L.d, comparados a 511 mg/L.d do biodigestor 1 (B1). Estes resultados podem ser descritos com base na quantidade de inóculo adicionado aos respectivos biodigestores, uma vez que o B2 recebeu quase que o dobro de inóculo em relação ao B1, 33% e 18%, sendo assim, no biodigestor 2 havia mais microrganismos para degradarem a carga orgânica presente no meio, contribuindo para maior remoção de DQO.

Nas **Figura 19** e **Figura 20** estão os gráficos que melhor ilustram os resultados e comportamentos supracitados.



**Figura 19** – Monitoramento e remoção de DQO no B1.



**Figura 20** – Monitoramento e remoção de DQO no B2.

Analisando os períodos de decréscimo de remoção de DQO, pode-se elencar alguns motivos que puderam levar a este resultado como: dificuldade dos microrganismos em degradar a matéria orgânica presente, inibição de microrganismos devido a alta concentração de ácidos voláteis e aumento do teor de carbono no meio pelo acúmulo de biomassa morta causada pela inibição.

#### 6.4 – Comportamento dos Sólidos

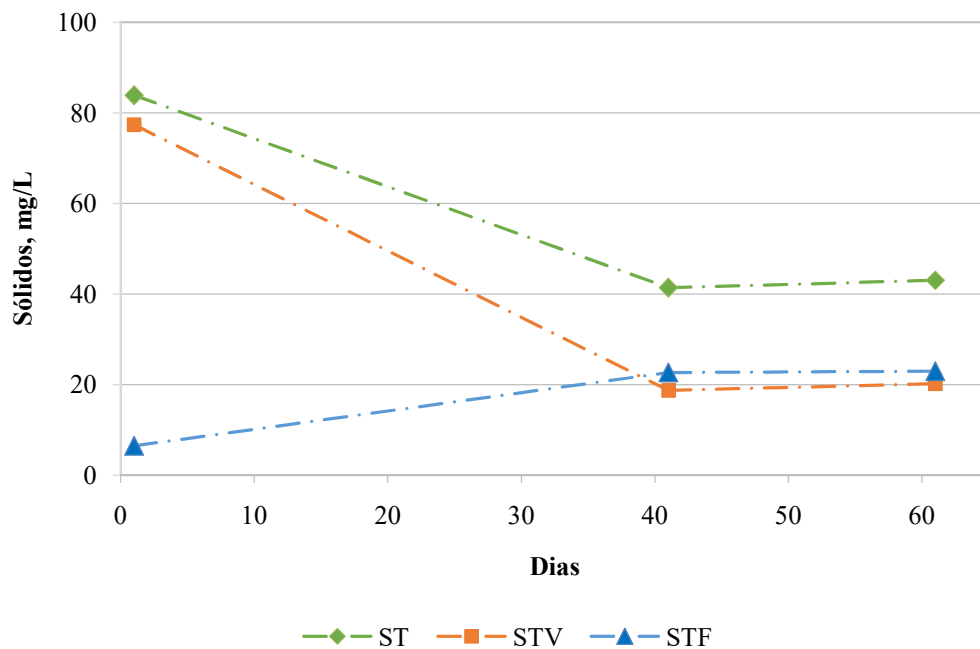
Nas **Figura 21** e **Figura 22** estão apresentados os resultados de sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis para os biodigestores 1 e 2, respectivamente.

Pode ser observado que nos primeiros 40 dias de operação, em ambos os sistemas, houve uma grande remoção de sólidos devido à remoção de sólidos voláteis, chegando a 70% nos dois biodigestores. A partir do 40º dia os sistemas apresentaram comportamentos diferentes, onde a remoção de sólidos voláteis no B1 permaneceu praticamente constante (68%), enquanto no B2 continuou crescente, atingindo um máximo de 79% com os 60 dias de operação.

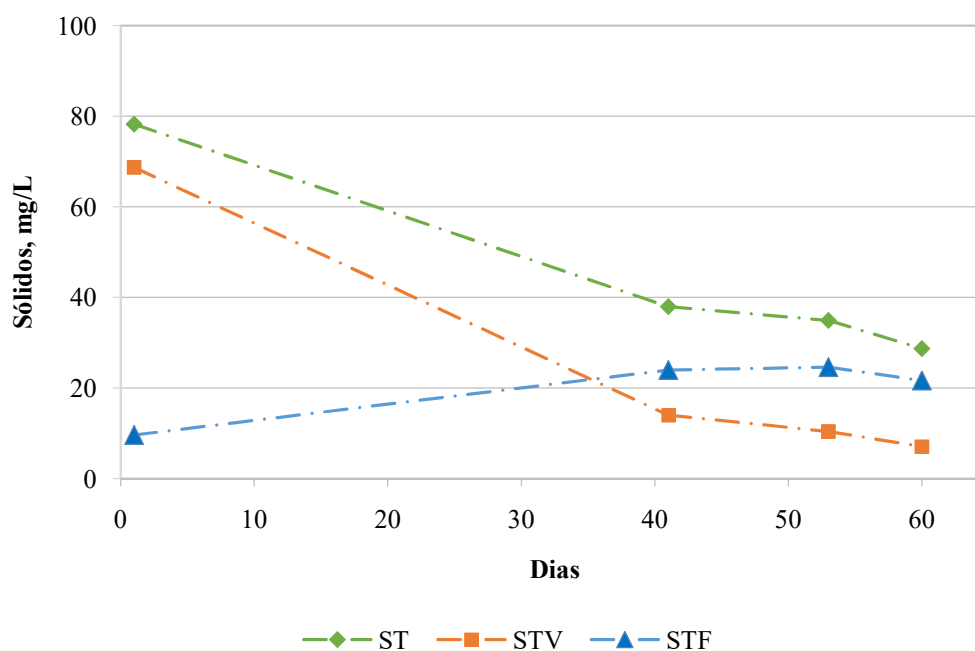
Nos trabalhos de Srisowmeya *et al.* (2019), para processos realizados com resíduo sólido urbano e em temperaturas mesofílicas, podemos encontrar remoções de

sólidos voláteis nas faixas de 71,6% com tempo de retenção de 24 dias, em casos onde há recirculação a remoção pode ser otimizada, chegando a 80% em 12 dias. Em contrapartida, Leite e Povinelli (1999) obtiveram remoções de 81% de sólidos voláteis com 210 dias de operação. Desta forma, observa-se que ambos os sistemas tiveram um resultado hora equivalente ao encontrado na literatura, hora melhor ao encontrado na literatura.

Quanto aos sólidos fixos, seu comportamento é sempre inverso ao dos sólidos voláteis. Isso acontece porque os sólidos fixos são, teoricamente, a parte não biodegradável dos sólidos, portanto não sofrem conversão no processo de digestão anaeróbia e seu pequeno aumento se dá ao fato de alguns sólidos voláteis poderem dar origem a sólidos fixos ao sofrerem a degradação.



**Figura 21** – Resultados das análises de sólidos do B1.



**Figura 22** – Resultados das análises de sólidos do B2.

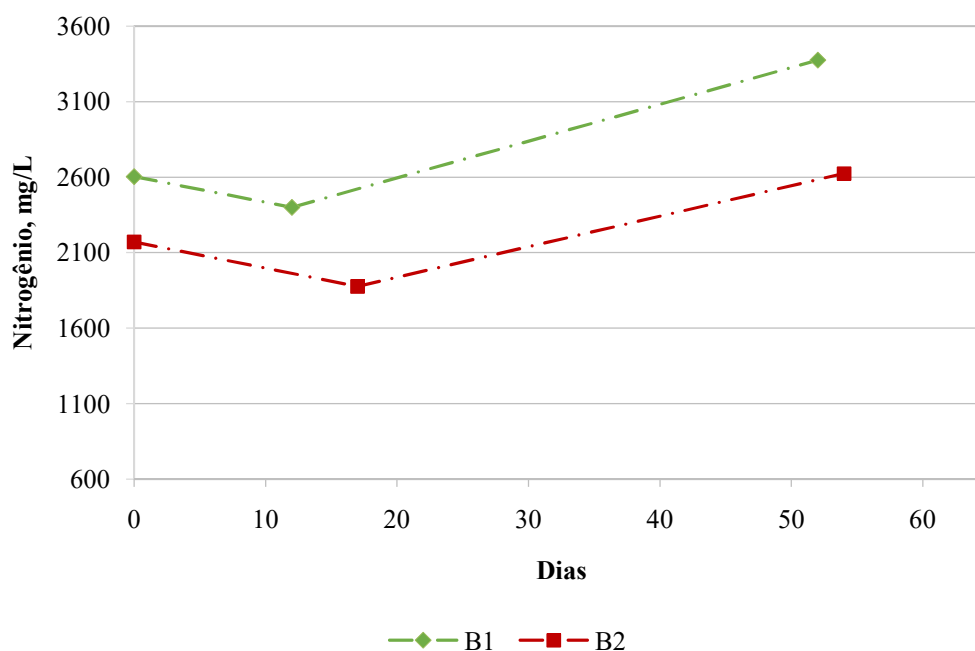
## 6.5 – Comportamento do Nitrogênio Total Kjeldahl e Fósforo

Nas **Figura 23** e **Figura 24** são demonstrados os resultados do acompanhamento de nitrogênio total kjeldahl e fósforo para os biodigestores 1 e 2.

Analisando os resultados obtidos para nitrogênio, constata-se que nos primeiros 10 – 15 dias, ambos os biodigestores apresentaram um decaimento de sua concentração, entretanto, entre o 20° e 50° dias houve um aumento de 40% em relação ao ponto anterior de análise. Esse comportamento pode ser explicado porquê no decorrer do processo de digestão anaeróbia tem-se nitrogênio sendo consumido como nutriente, mas em paralelo existe a formação de compostos nitrogenados devido a degradação de proteínas. Sendo assim, o decaimento inicial de nitrogênio se deu por causa do maior consumo do nutriente pelos microrganismos, contudo, conforme o processo foi desenvolvendo, tivemos um saldo de formação de compostos nitrogenados maior que o consumo, caracterizando o crescimento da concentração de NTK.

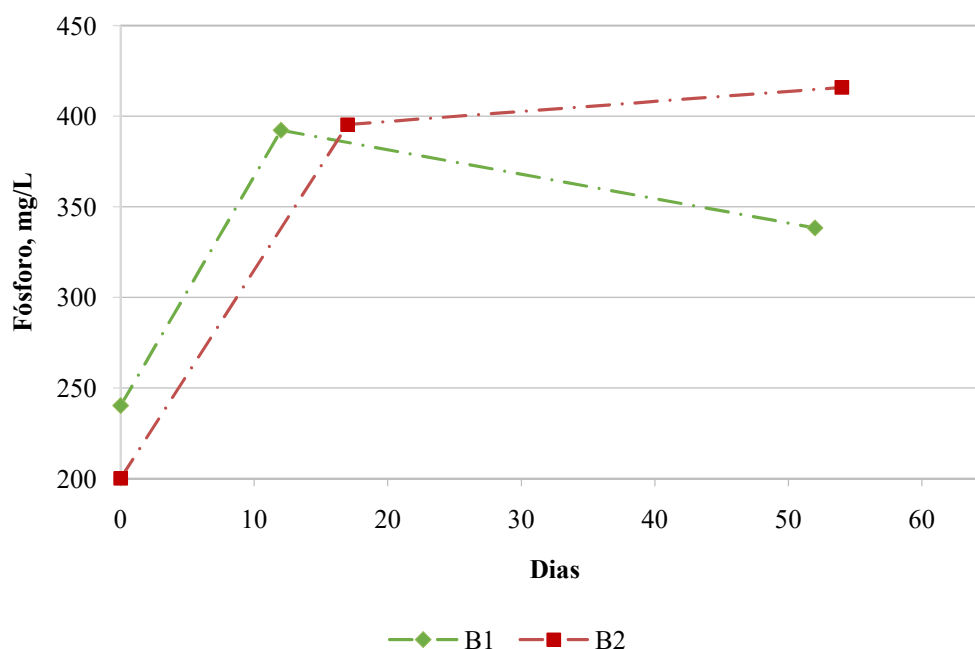
Vale lembrar que houve uma estabilização do pH no mesmo período de crescimento do nitrogênio, ou seja, o nitrogênio na forma amoniacal combinado com o carbonato atuaram como tampão para o substrato, gerando esta estabilização do sistema, conforme consta na literatura. Em relação à razão DQO:N, cabe lembrar que não foi

realizada suplementação de nitrogênio, entretanto, a razão manteve-se flutuando entre 20 e 30 para ambos os biodigestores.



**Figura 23** – Resultados do monitoramento de NTK nos biodigestores B1 e B2.

Tomando os resultados do acompanhamento do fósforo, no período dos 10 – 15 dias iniciais observa-se um aumento da concentração de fósforo em ambos os biodigestores, sendo que a partir deste período os biodigestores apresentaram comportamento inverso, onde o B1 teve um decaimento e o B2 um crescimento da concentração de fósforo. Quanto à razão DQO:P, esta foi decaindo ao longo do processo, visto que houve uma alta remoção de DQO e acréscimos na concentração de fósforo. Suplementações posteriores ao início do processo não foram realizadas, de forma que possa ter influenciado negativamente na eficiência do processo.



**Figura 24** – Resultados do monitoramento de fósforo nos biodigestores B1 e B2

## 6.6 – Produção de Biogás em B1 e B2

A produção de biogás nos biodigestores apresentou resultados interessantes, o B1 produziu 29L, enquanto o B2 63L, contendo teores acumulado de metano de 82% e 95%, respectivamente. Os resultados estão expressos na **Tabela 10**.

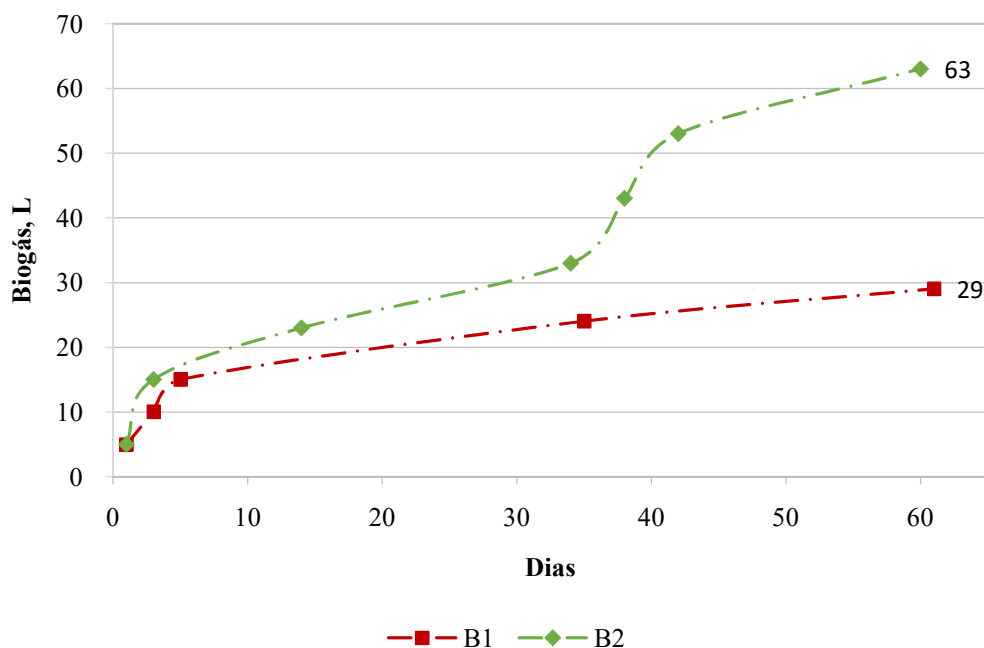
**Tabela 10** – Resultados da produção de biogás nos biodigestores B1 e B2.

	Dias de operação	Taxa de produção de biogás (L/dia)	Acumulado		Teor de Metano (%)
			Biogás (L)	Metano (L)	
<b>B1</b>	60	0,5	29	23,8	82%
<b>B2</b>	60	1,1	63	59,9	95%

Observa-se que, exceto pelo teor de metano, o biodigestor 2 apresentou o dobro dos resultados obtidos pelo biodigestor 1, onde correlaciona-se com os resultados de DQO, uma vez que o B1 atingiu um máximo de 46% de remoção de DQO e o B2 81%. Como já citado anteriormente, a produção de biogás está diretamente relacionada com a remoção de DQO, podendo ser relacionacada, segundo Enitan *et al.*(2015) pela equação abaixo, onde a constante é dada em litros de metano produzido por grama de DQO removida:

$$CH_4(L) = 0,362 * DQO_{REMOVIDA}(g)$$

Contudo, neste estudo foram encontradas as relações de 0,618 e 0,982  $LCH_4/gDQO_{removida}$  para o B1 e B2, respectivamente. Quanto ao início da produção de biogás, ambos os biodigestores apresentaram um tempo lag de 1 dia apenas, mostrando que parte da matéria orgânica já estava sendo degradada pelos microorganismos. A evolução da produção de biogás pode ser conferida na **Figura 25**:

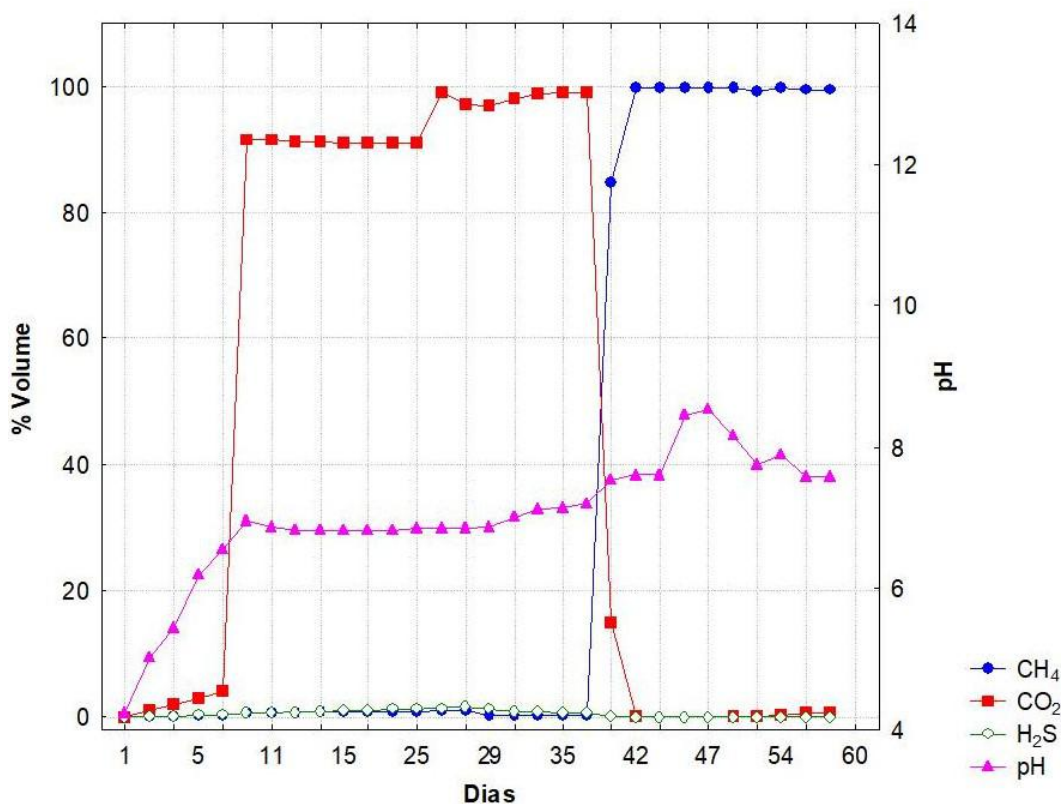


**Figura 25** – Produção acumulada de biogás para os biodigestores B1 e B2.

Analisando-se a evolução da composição do biogás do biodigestor 2 em função do tempo decorrido do processo e do pH do meio (**Figura 26**), é possível realizar uma análise integrada do processo de digestão anaeróbia. Nos primeiros 5 dias houve um pH levemente ácido e há produção de um biogás composto por  $CO_2$  e  $H_2$ , nesta fase o processo ainda encontra-se na etapa de hidrólise e há um pouco de acetogênese acontecendo, esta última que libera  $CO_2$  e  $H_2$ , bem como produz ácidos graxos, explicando os resultados encontrados. Em seguida, nos próximos 30 dias, houve uma alta produção de  $CO_2$ , podendo ser caracterizada como a entrada efetiva na etapa de acidogênese, mas também se começa a observar traços de  $CH_4$ , ou seja, início da metanogênese. Neste período há uma estabilização do pH, comentado anteriormente como sendo também um indicativo do consumo dos ácidos voláteis e avanço do processo de digestão anaeróbia. Por fim, a partir do 37º dia de operação tem-se uma inversão da



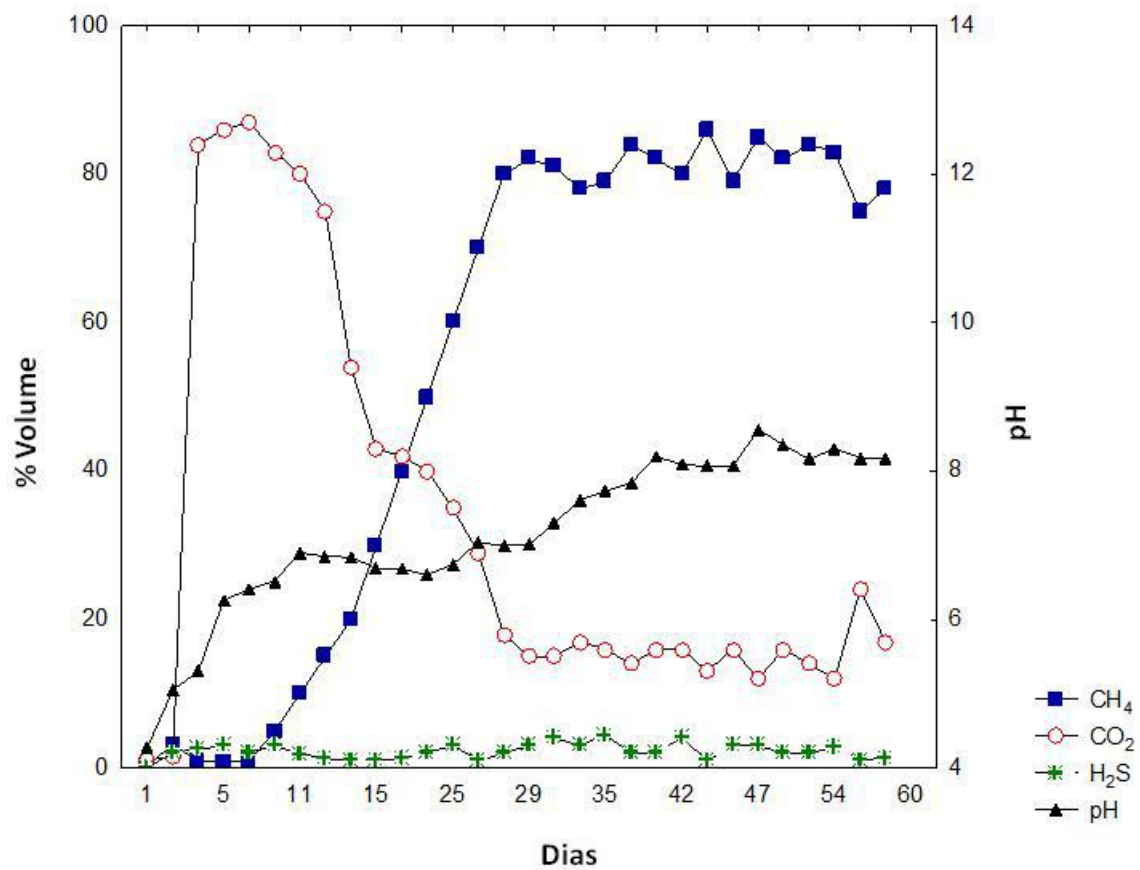
concentração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , caracterizando de fato a entrada na etapa de metanogênese, que também pode ser constatada pelo aumento do pH devido ao consumo dos ácidos presentes no meio.



**Figura 26** – Comportamento da composição do biogás e pH do B2.

Em contrapartida, o B1 apresentou comportamento diferente ao longo do processo, não sendo possível realizar uma análise integrada evolutiva em relação às etapas do processo de digestão anaeróbia em função da composição do biogás gerado. A evolução da composição do biogás no B1 está apresentada na **Figura 27**, observando-se que houve produção de metano desde os primeiros dias de processo, apresentando composição com comportamento crescente até aproximadamente o 27º dia, mantendo-se relativamente constante até o final do experimento. Similar ao observado no B2, quando houve aumento da concentração de  $\text{CH}_4$  no biogás, houve também um decréscimo da concentração de  $\text{CO}_2$ , confirmando a entrada na fase metanogênica, que também pode ser verificado pelo aumento do pH do meio. Entretanto, apesar da concentração de  $\text{CO}_2$  ter sofrido uma queda, ela manteve-se por volta dos 15%, podendo ser interpretado como se as metanogênicas hidrogenotróficas não estivessem em quantidade suficiente para

consumir todo  $\text{CO}_2$  gerado na etapa anterior.



**Figura 27** – Comportamento da composição do biogás e pH no B1.

# Capítulo 6

---

---

## Conclusão

Os resultados obtidos nos ensaios experimentais de codigestão anaeróbia do resíduo alimentar do Restaurante Universitário da UFRJ, esgoto domiciliar de uma estação de tratamento de esgoto da cidade do Rio de Janeiro, inoculados com lodo ativado de uma estação de tratamento de efluentes de um aviário também localizado na cidade do Rio de Janeiro, permitiram tomar as seguintes conclusões:

- Houve alta eficiência de degradação da matéria orgânica no B2, expresso em 81% de remoção de DQO, comparados à eficiência mediana do B1 com 46% de remoção de DQO, que pode ser justificado pelo *déficit* de inóculo [18% (B1) e 33%(B2)];
- Houve produção de biogás em ambos os sistemas propostos, produzindo metano em altas concentrações de 82% (B1) e 95% (B2);
- O B1 apresentou 0,618 LCH<sub>4</sub>/gDQO<sub>removida</sub> enquanto o B2 apresentou 0,982LCH<sub>4</sub>/g DQO<sub>removida</sub>;
- O controle de pH, temperatura e concetração de inóculo são essenciais para o desempenho satisfatório da digestão anaeróbia;
- A codigestão anaeróbia é uma boa alternativa para o tratamento de resíduos sólidos e efluentes ricos em matéria orgânica e
- Por fim, a baixa concentração de H<sub>2</sub>S durante todo o processo em ambos biodigestores demonstraram que os parâmetros fundamentais para uma eficiente produção de biogás e remoção de DQO foram controlados e monitorados e o sistema totalmente fechado, impediu a entrada de oxigênio no interior dos biodigestores.

# Capítulo 7

---

---

## Sugestões para Trabalhos Futuros

Tendo em vista o potencial energético do biogás da digestão anaeróbia, bem como os resultados obtidos e a busca por aperfeiçoamento de fontes sustentáveis de energia, deixo sugestões para os trabalhos futuros:

- Avaliar o potencial energético do biogás formado pela digestão anaeróbia da codigestão de resíduos orgânicos e esgoto;
- Desenvolver um modelo cinético de produção de biogás pela codigestão anaeróbia do resíduo alimentar e esgoto e
- Construir biodigestores em escala maior e implementar sistema de automação e controle para sensores de gases e purificação do biogás.

# Capítulo 8

---

---

## Referências Bibliográficas

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica., Banco de Informações de Geração (BIG) 2019. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelPorClasse.cfm?Classe=Biomassa>. Acesso em: nov 2019

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica., Matriz de Energia Elétrica 2019. Disponível online em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>. Acesso em: nov 2019.

APHA - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, 2005, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. New York, 21th ed.

AVELLAR, L. H. N. A valorização dos subprodutos agroindustriais visando a cogeração e a redução da poluição ambiental. 2001, 111f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2001.

BOLZONELLA, D., INNOCENTI, L., PAVAN, P., TRAVERSO., CECCHI F. Semi-dry thermophilic anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: focusing on the start-up phase. *Bioresourse Technology* 86. pp 123-129. 2003

BORGES, A. C. (2003) “Influência da estratégia de alimentação no desempenho do reator anaeróbio em batelada seqüencial contendo biomassa imobilizada”. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 170 p.

BRASIL, Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos: Altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm). Acesso em: novembro de 2012.

CASSINI, S. T. Digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de Biogás. 1. Ed. Vitória: PROSAB/FINEP, 2003. 196p.

CECCHI, F., PAVAS, P., AVAREZ. J. M., BASSETTI. A., COZZOLINO. C. Anaerobic Digestion of Municipal Solid Waste: Thermophilic vs. Mesophilic Performance at High Solids, *Waste Management & Research*, 9, pp 305-315 1991.

CIRNE DG, PALOUMET X, BJO L. Anaerobic digestion of lipid-rich waste — effects of lipid concentration 2007;32:965–75. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.003>.

COELHO, S. T.; VELÁSQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Rio de Janeiro: Congresso Brasileiro de Energia, 2006.

ENITAN, A. M., ADEYEMO, J., SWALAH, F. M., BUX, F. Anaerobis digestion model to enhance treatment of brewery wastewater for biogas production using UASB

reactor. EnvironModelAccess 20. pp 673-685. 2015

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Rio de Janeiro, nov. 2008. Disponível em: [https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/mme\\_epe\\_aproveitamento\\_rsu\\_ms.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/mme_epe_aproveitamento_rsu_ms.pdf). Acesso em: nov 2019

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbano. Rio de Janeiro, out. 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20->. Acesso em: nov 2019

FERREIRA, L. M.V Contribuição para o Estudo da Modelação da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos. Estudo da Influência da Geometria do Reator na Cinética do Processo. Edições Caolibri, Instituto Politécnico de Lisboa, Portugal, 2010.

G. SRISOWMEYA., M. CHAKRAVARTHY., G. NANDHINI DEVI., 2019. Critical considerations in two-stage anaerobic digestion of food waste – A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews.(Article in press)

IBGE, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>. Acesso em: nov 2019.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos, Relatório de Pesquisa, Brasília 2012. Disponível em: [http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf). Acesso em: nov 2019

JORDÃO, E., PESSÔA, C. A. (2005). “Tratamento de Esgotos Domésticos”. 4ª ed., Rio de Janeiro, ABES. 906 p.

KOCH, K., PLABST, M., SCHIMIDT, A., HELMEREICH, B., DREWES, J. E. Co-digestion of food waste in a municipal wastewater treatment plant: Comparison of batch tests and full-scale experiences. Waste Management 47. pp 28-33.2016

KRISHNA, D., KALAMDHAD, A.S., (2014). Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – a review. J. Environ. Chem. Eng. 2, 1821–1830.

LASTELLA, G., TESTA, C. CORNACCHIA, G., NOTOTNICOLA, M., VOLTASIO, F., SHARMA, V.K., 2002. Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogas production and its purification, Energy Conversion Management, v 43 (1), pp 63-75

LEITE, V. D., & POVINELLI, J., Comportamento dos sólidos totais no processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos e industriais. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v3, n2. pp229-232. 1999

MA, Y., LIU, Y., 2019. Turning food waste to energy and resources towards a great environmental and economic sustainability: an innovative integrated biological approach. Biotechnol. Adv (Article in press)

MAGHANAKI MM, GHOBADIAN B, NAJAFI G, GALOGAH RJ. Potential of biogas

production in Iran. *Renew Sustain Energy Rev* 2013;28:702–14

MATHERI AN, BELAID M, SEODIGENG T, NGILA CJ. Modelling the kinetic of biogas production from co-digestion of pig waste and grass clippings. *Lect Notes Eng Comput Sci* 2016;2224.

METCALF & EDDY. (1991) “Waste engineering: Treatment, disposal, refuse”. 3 ed., McGraw-Hill, New York, 1334p.

MOLINO, A. *et al.*, 2013. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, v 103, pp 1003-1009

MOTTET, A., RAMIREZ, I., CARRÈRE, H., DÉLÉRIS, S., VEDRENNE, F., JIMENEZ, J., STEYER, J.P., 2013. New fractionation for a better bioaccessibility description of particulate organic matter in a modified ADM1 model. *Chem. Eng. J.* 228, 871–881

ONU, Organizações das Nações Unidas., Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 25 set. 2015. Disponível em: <https://nacoesunidas.org/conheca-os-novos-17-objetivos-de-desenvolvimento-sustentavel-da-onu/amp/>. Acesso em: nov 2019

PRAMANIK, S. K., SUJA, F. B., ZAIN, S. M., PRAMANIK, B. K., 2019. The anaerobic digestion process of biogas production from food waste: Prospects and constraint, *Bioresource Technology Reports*, v8. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100310>.

SGORLON, J. G., RIZK, M. C., BERGAMASCO, R., TAVARES, C. R. G. Avaliação da DQO e da relação C/N obtidas no tratamento anaeróbio de resíduos frutihortícolas. *Acta Scientiarum Technology*, Maringá, v. 33, n4. pp421-424

SILVA, C.A.B.V. Limpeza e Purificação de Biogás. 2009. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2009.

SLORACH, P.C., JESWANI, H.K., CUÉLLAR-FRANCA, R., AZAPAGIC, A., 2019. Environmental sustainability of anaerobic digestion of household food waste. *J. Environ. Manag.* 236, 798–814.

VON SPERLING, M., 1996. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 2. Ed. – Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais.

WEILAND, P. Stand und Perspektiven der Biogasnutzung und -erzeugung in Deutschland, *GülzowerFachgespräche*, vol 15: Energetische Nutzung von Biogas: Stand der Technik und Optimierungspotenzial, pp. 8 – 27, Weimar, 2000.

YEBO, L, PARK, S.Y., ZHU, J., 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v 15(1), pp 821-826

YUE L., YINGUANG C., JIANG W. 2019. Enhancement of methane production in anaerobic digestion process: A review, *Applied Energy*, v 240 (2019), pp 120-137. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.243>